MEMENTO DES RISQUES BIOLOGIQUES À L'ATTENTION DES JURISTES

Point de vue d'un microbiologiste sur les risques et leur gestion

* * *

PLAN



Introduction

Vous allez vous demander – ou je vais le faire à votre place – pourquoi un biologiste ou, pire, un microbiologiste, vient raconter des histoires extravagantes à des juristes. La raison est que les juristes et les microbiologistes sont des représentants de la même rigueur et de la même discipline. Ils travaillent dans le même domaine et dans le même sens : l'invisible, le compliqué, le redoutable avec l'idéal de bien faire ; pour eux, le défaut zéro existe, c'est même le seul objectif à tenir en permanence et le moindre écart de conduite a des conséquences dommageables, disproportionnées, considérables, parfois capitales. Nous devons pratiquer la patience dans l'urgence. On dit que **la justice est lente ; la microbiologie l'est peut-être bien davantage**.

Aujourd'hui, en situation de crise aiguë, le Droit et la Biologie travaillent au mieux en parallèle, le plus souvent en décalé[1], comme juxtaposés, mais les leviers de commande de la gestion leur échappent en laissant de l'espace et du temps aux interventions prématurées, aux précipitations hasardeuses ou aux affirmations désastreuses d'irresponsables (au vrai sens du terme ; *cf*. crise politique et médiatique autour du concombre 2011, par exemple). J'imagine que le Droit et la Biologie travaillent ensemble dans des situations inédites de crise qui vont se présenter de plus en plus souvent et dépasser largement le cadre de l'alimentation et de la santé. C'est pourquoi je vous propose d'entrée de réfléchir à un pilotage commun unique de ces crises par une équipe restreinte, habilitée, bi-disciplinaire (juristes, biologistes), chargée d'enquête, maîtrisant à la fois les règlements et les techniques (la tête et les bras). Sachant que le dernier mot reviendra toujours au droit : si vous découvrez, par exemple, que votre plage préférée est polluée, la microbiologie n'en finira pas de désigner le microorganisme responsable et d'hésiter sur la source potentielle tandis que l'autorité vous retirera le droit de vous y baigner. *Idem* de l'hôtel climatisé qui sera fermé en cas de symptômes grippaux cumulés bien avant que la *Legionella* soit ciblée et isolée. *Idem* de la cantine du lycée ou du restaurant universitaire, pour raison de *TIAC* dans l'établissement. *Idem* en cas de suspicion de flambée épidémique bactérienne ou virale en maison de retraite. Si la microbiologie et le droit avaient pris l'habitude de travailler ensemble et de s'imposer, il y a fort à parier que l'économie et le commerce des concombres auraient été épargnés. Et les médias, moins ridicules.

On pourrait donc imaginer des juristes imprégnés des textes réglementaires (lois, normes, qualité, risques), rompus aux rouages des procédures, faire équipe avec des techniciens de la microbiologie, sous réserve d'un minimum de formation commune : si je vous envoyais dans l'instant à la plage effectuer le prélèvement d'un échantillon d'eau de mer pour analyse, sans méthode ni protocole, votre échantillon représenterait 1% des populations contenues dans l'eau de mer à cet endroit. Et pourtant, la technique est simple.

La difficulté principale vient du fait que les bactéries coupables ou innocentes n'ont pas la taille des girafes et que nous ne les voyons pas. Elles sont petites (entre 0,3 et 3 µm, avec en moyenne 1,5 µm pour le plus grand diamètre ; bien dire micromètre). Elles se ressemblent toutes, vivent en communautés (populations, colonies) et forment un vaste groupe très homogène, ou *continuum*

[1] A notre époque, en situation de crise aiguë, la Microbiologie semble se conduire en frein à main pour empêcher d'agir vite et au hasard ; le Droit semble courir derrière la crise en tentant de la rattraper à coups de jurisprudence.

procaryote dans lequel les savants, par commodité, essayent de définir des entités discontinues (genres, espèces, souches, clades). Dans une toxi-infection alimentaire ou un événement de pollution, une contamination à l'hôpital ou une défaillance industrielle, on recherche le germe en cause ; mais qu'on s'entende bien, **si l'on recherche des salmonelles (« *suspicion de* – ») et que l'échantillon prélevé contient des staphylocoques, votre analyse aboutit à la réponse suivante : absence de salmonelles.** Vous devinez pourquoi risque et danger sont pris l'un pour l'autre en microbiologie.

La Microbiologie descriptive est née au 17e siècle (van Leeuwenhoek) comme l'astronomie (Galilée) grâce à la maîtrise du polissage des lentilles. La Microbiologie empirique est née en même temps que l'agriculture sédentaire et la Microbiologie savante commence avec les travaux de **Louis Pasteur**, chimiste cristallographe, dans les années 1860. L'Écologie microbienne est née à la même époque avec les travaux d'Ernst Haeckel sur le Cycle de la matière, l'Écologie et les arbres phylogénétiques de parenté biosphérique.

La **Microbiologie générale** actuelle ne correspond pas exclusivement à l'**étude de la vie des bactéries, des moisissures et des levures**. C'est aussi (et surtout) dans ses facettes appliquées au quotidien, se glisser dans l'hygiène et la toilette, le lavage des mains et les antibactériens, les lessives et les couches du bébé, le tout à l'égout et les stations d'épuration, le nettoyage de la maison et l'usage de l'eau de javel, le repas avec le pain, le vin, la bière, le saucisson, les fromages, la choucroute et le yaourt, le vinaigre et les conserves, les intoxications, faire bouillir l'eau potable pour le thé, les civets, les confitures, le miel, les aliments du réfrigérateur, l'eau de vie, les matelotes et le jus de citron ; c'est aussi se brosser les dents, le mercurochrome pour les petits bobos, l'eau oxygénée et le bleu de méthylène, les pansements et les vaccinations, avoir la fièvre, soigner son angine, prendre ses antibiotiques, faire une inhalation ou traiter son acné, tousser, éternuer, cracher et se moucher. C'est encore faire ses analyses, trier ses déchets domestiques, faire son compost, donner un baiser, se protéger des maladies sexuellement transmissibles avec un préservatif. C'est encore la nuit si l'on en croit les chrono-biologistes. Avec du recul, c'est aussi l'agriculture, les biotechnologies, les énergies renouvelables et l'environnement. Vous voyez que les microbiologistes ont du travail pour longtemps à chercher et découvrir, former et informer.

Aujourd'hui, la Microbiologie moderne est partagée et débordée par la recherche anglo-saxonne. Et la société française n'est pas prête à écouter ses résultats (génétique, OGM, biochimie, méthane, biocarburants, brevets, cryptage).

J'avais le choix entre, d'une part, expliciter quelques événements de crises, la tête dans le guidon, et juxtaposer des collisions tragiques entre les bactéries et les hommes pour vous impressionner (choisir de vous décrire « quelques dents du peigne ») ou, d'autre part, prendre du recul, sortir la tête du guidon, vous donner quelques clés pour comprendre comment peuvent se trouver réunies les conditions d'un petit ou d'un grand drame et quel genre de jeu se joue entre les hommes et les bactéries, et donc vous donner l'envie d'en savoir plus.

Pour simplifier le jeu en question, disons que **les hommes détruisent des bactéries par milliards et que les bactéries détruisent des hommes par millions** ; dans cette partie de bras de fer, **les hommes**

survivants s'affaiblissent, les bactéries survivantes se fortifient. Le début de l'histoire remonte aux origines du couple (peut-être avant), la chute de l'histoire est simple à deviner ; seule la date est inconnue de nous. En levant la tête du guidon, je ne lâche pas l'assiette, mais je découvre l'aliment et son histoire, la terre, l'eau et les hommes qui l'ont produit ; et en levant encore la tête, je touche aux événements qui ont marqué le territoire de production (mercure, DDT, dioxines, *etc*.).

Ayant opté depuis longtemps pour le camp bactérien, j'ai choisi pour vous la deuxième formule, de vous offrir « le peigne avec le manche et toutes ses dents », ainsi que le mode d'emploi du peigne[2].

Je milite depuis longtemps pour une **responsabilisation des citoyens** (microbiologiquement parlant), pour une solide formation (école, collège, lycée, université, association) et un encadrement réglementaire souple[3] (en amont ; pour que la Justice joue pleinement son rôle) laissant place à l'initiative, à l'audace, à la tradition, au terroir, à la qualité, avec un code-cadre généraliste pour outil d'arbitrage, pour juge de paix, et des hommes dépositaires de notre confiance pour en décider. Des humanistes.

---

[2] Les dents sont pointues dans leurs domaines respectifs mais ne communiquent pas ; elles restent séparées sinon compétitrices.

[3] C'est l'image de la commode ou de l'outil qui doit rester l'élément simple et référentiel, rigide et dépouillé, sobre et minimaliste et c'est à nous de déposer des objets suivant que nous sommes ordonnés ou pas ; avec l'excès de réglementation, de procédures et d'instructions, nous diluons la rigidité et donc la responsabilisation ; personne ne comprend ; c'est comme si notre outil juridique était un marteau tout mou.

Définitions et Systématique des Risques

Risques biologiques

La prise en compte (française, européenne) des risques et des dangers en matière de santé et d'environnement est récente ; elle s'est opérée dans l'urgence, du fait de l'accumulation d'accidents, de drames et d'incidents qui montraient encore du doigt que, **dans toutes les activités humaines, les mesures de sécurité viennent toujours après les tragédies**, les expériences catastrophiques et que l'anticipation par la responsabilité individuelle est encore utopie pour longtemps.

Vocabulaire et définitions

Il s'agit de regarder l'horizon lointain, dans un **axe Homme-Environnement-Santé**, et dans un cadre de gouvernance de territoire à taille humaine (communauté de communes, pays, région ou province) dans un contexte de développement durable. En tournant le dos à la langue de bois du « risque zéro n'existe pas ». La notion est récente en terme sociétal (1976) et l'approche est globale : le risque environnemental est perçu comme lié à l'activité des hommes.

Nous faisons d'entrée une différence radicale entre **risque naturel** (fatalité d'un événement, tempête, inondation, volcanisme, tsunami) et **risque technologique** (responsabilité humaine avérée, notion de risque majeur, contingences et circonstances).

Le **danger** (même racine que « dame » et « domicile » !) correspond à une situation de crainte d'un événement redouté dont nous avons conscience (par expériences antérieures rapportées), défavorable ou préjudiciable (épidémie) ; c'est une menace, éventuellement un péril ; l'homme en est avisé en général : danger de mort ; la démonstration du bien-fondé de la crainte, c'est l'accident (Blaye 1997, Titanic 1912, Toulouse AZF 2001). Le volcan est un danger. L'éruption volcanique est un grand danger.

Le **risque** (origine italienne : fortune ou malchance ; origine arabe : ration journalière), c'est souvent un rapprochement du danger par tout un ensemble de circonstances, d'éventualités ; il est plus ou moins connu des victimes, plus ou moins indépendant de leur volonté (savoir ou ne pas savoir prendre des risques). Déménager pour habiter au pied du volcan en activité, c'est prendre des risques.

Dans notre analyse moderne de référence, il y a 3 réactions face au risque, de la sémantique à la statistique, c'est :

- **Le calcul du risque** : la probabilité d'occurrence d'un accident, sa fréquence possible ;
- **L'orientation technique**, qui suppose des mesures, des contrôles, des dosages, des échantillonnages, des paramètres et des courbes ;

- **L'orientation réglementaire**, avec des normes, des règlements, des procédures, des sanctions selon les connaissances du moment.

Dans l'arsenal du vocabulaire thématique, on compte :

- la **fatalité** (faille, erreur humaine, le risque 0 n'existe pas) ; c'est souvent une malchance avec un événement climatique ou tellurique ;

- la **leçon** qui est retenue est traduite en précautions (principe de précaution, réactualiser en l'état des connaissances) et en dispositifs de protection des personnes et des biens (effet barrière) ;

- la **prévention**, c'est une anticipation par sécurité active + passive (exemple des silos vis-à-vis des explosions, information, formation) ;

- la réaction de **correction**, qui correspond à une démarche de progrès par renfort de la sécurité ; souvent postérieure aux accidents ;

- dans la **modélisation**, l'accident est scénarisé, étudié et l'organisation des procédures est modifiée sur les points faibles (arbre de défaillance, arbre de décision, procédures écrites).

A noter que le système marche bien sur la base du volontariat. Reste la réglementation avec les mesures, les paramètres, les normes, les seuils et les contrôles ; il manque l'essentiel : la **responsabilisation** avec le comportement et les valeurs au travail.

Christophe Colomb a pris la mer par l'ouest : le danger était connu, non mesurable, le risque considérable. On dit d'ailleurs prendre des risques ; mettre sa vie en danger.

Le **risque biologique**[4] peut mettre en péril la vie des populations exposées selon une échelle dont nous avons du mal à évaluer les degrés (santé, autre, système de notation) ; il est soit direct par contact physique avec le contaminant, soit indirect (substrats et conditions qui favorisent un ou des organismes dangereux, histoire du produit).

---

[4] Deux exemples historiques tragiques : Howard Ricketts (1871-1910) est professeur de pathologie à Chicago. Il meurt à 39 ans du typhus épidémique causé par une petite bactérie (*Rickettsia prowazekii*), intracellulaire et parasite. Le germe est isolé et décrit par Rocha-Lima (1916), il est transmis par les poux. Le réservoir est l'écureuil. 50% de mortalité chez les personnes âgées (la bactérie aura aussi raison du tchèque Prowazek mort en 1915 du typhus). Louis Thuillier (1856-1883) est un brillant Amiénois qui rejoint l'équipe pastorienne travaillant sur le choléra (épidémie en Inde, 1817-23, en Russie, 1846-61, puis en Afrique, 1832-60 avec par exemple 600.000 morts en France). Cette équipe est envoyée par Pasteur le 15 août 1885 à Alexandrie quand une autre équipe (prussienne), dirigée par R. Koch, fait le même voyage. Thuillier meurt d'un choléra foudroyant en une nuit à Damiette (Alexandrie) à 27 ans le 18 septembre 1883. L'historien De Calonne avait indiqué sa participation à la lutte anticholérique à Amiens. Le germe sera isolé par Koch à Calcutta, la vaccination par Ferran en 1885.

Les **principaux risques** sont : le péril fécal (eaux usées, alimentation, collectivités), le risque nosocomial, le risque des germes émergents, le risque de pandémie[5] (grippe aviaire, risque sanitaire), le risque de bioterrorisme, le risque biotechnologique...

Le risque est **à géométrie variable**, d'individuel à collectif, de ponctuel à planétaire, d'une envie de coquillage prélevé sur la plage d'été à l'air conditionné du bureau ; du repas à la cantine à la grippe aviaire. Le risque biologique peut aussi venir du milieu contaminé et/ou des activités humaines (industriel, environnemental, commercial).

Concrètement, il existe 4 groupes (1994) d'agents biologiques selon les risques encourus (faible, modéré, fort, majeur). Sauf que ces catégories sont figées et n'anticipent pas sur le risque OGM, le risque technologique (fuite de laboratoire, prion, virus), sur le risque de résistances accrues aux antibiotiques et à l'émergence aléatoire de germes fulgurants ou de mutations imprévues, sur le risque au laboratoire ; **ces catégories font de la « *jurisprudence like* » et méritent d'être critiquées**.

Les 4 groupes de Risque biologique

Groupe 1, Risque faible : agents biologiques non susceptibles de provoquer une maladie ; risque individuel nul, absent pour la communauté.

Groupe 2, Risque modéré : agents biologiques pouvant provoquer une maladie chez l'homme et constituer un danger pour les travailleurs ; propagation peu probable, prophylaxie et traitements efficaces ; risque individuel modéré, risque pour la communauté et l'environnement non nul mais limité ; mesures préventives et curatives.

Groupe 3, Risque fort : agents biologiques pouvant provoquer une maladie grave chez l'homme et constituer un danger sérieux pour les travailleurs ; risque de propagation collective et environnementale ; prophylaxie et traitements connus efficaces ; risque individuel important ; risque collectif et environnemental modéré ; mesures connues.

Groupe 4, Risque majeur : agents biologiques pouvant provoquer une maladie grave chez l'homme ; danger pour les travailleurs ; risque de propagation élevé, ni traitement connu, ni prophylaxie ; risque individuel très élevé, collectif et environnemental élevé et grave.

---

[5] L'effet mémoire est important à propos de risque biologique. Les épidémies de peste (6[e], 13[e], 14[e], 16[e], plus de 100 millions de morts), de lèpre (mutilante), de variole (petite vérole), de choléra et de grippe ont poussé les populations à établir une relation entre la maladie, d'une part, et la peur ou la punition du ciel, d'autre part. A partir de la fin du 18[e] (découvertes, pensée et philosophie), la trajectoire de l'humanité va droit à l'euphorie grâce aux découvertes considérables sur la planète Terre (planète vivante), dans une approche holistique. Puis vient l'approche universelle et l'étude des bactéries (univers bactériel, hypothèse Gaia où la Terre est considérée comme un giga-organisme). On découvre que l'homme et les microorganismes tiennent les 2 rôles majeurs ; la notion de cycle élémentaire est établie, puis de cycle de la matière, de continuum, d'écologie. On découvre l'ampleur et l'ubiquité du monde microbien, l'unicité de parenté des formes vivantes et de la nécessité des microorganismes. Les applications sont l'objet d'études (agriculture, alimentation, conservation, santé) et l'on découvre l'étendue des savoirs empiriques (artisanats, arts). Nous allons vers l'idée d'un monde « sans limites », des « ressources vivantes », de la biodiversité. Les savants affirment qu'il ne semble pas que l'on puisse vivre « *free germ* » et la communauté scientifique vit sur le principe de l'infaillibilité microbienne (chimistes) jusqu'au réveil brutal du DDT à partir de 1954.

La partie de la Microbiologie qui traite du risque biologique est l'**épidémiologie**.

La systématique illustrée des risques s'inspire de la microbiologie générale des années 50 ; elle n'est pas en phase avec la modernité du génie génétique ou de la biologie moléculaire.

Le biologiste travaille avec le technicien et quelques représentants des autorités (services de l'État, DRIRE - DREAL, INERIS, mais **pas de juriste**) pour établir une sorte de grille (échelle) qui permettrait d'évaluer le risque sous forme de grandeur chiffrée ; les approches d'analyse recherchent des paramètres pertinents et des instruments de mesure faciles à utiliser et à interpréter.

Les directions d'exploration retenues sont les suivantes :

- **Impact** et sensibilité environnementale du milieu impacté (grille ; note de 1 à 4 ; notion de milieu sensible).

- **Fréquence** potentielle d'impact (note de 1 à 4) ;

- Gravité et hiérarchisation d'un événement ou d'une pollution avec 3 analyses : nature et origine, étendue, volume.

- Niveau de **maîtrise** en termes d'organisation de la prise en charge et d'actions prévues.

On débouche sur la nécessité de formation continue, de progrès lié aux connaissances et de management. L'origine de la **« Bonne évaluation des risques »** remonte aux États-Unis (Académie des Sciences, 1983) et, en France, aux travaux de l'INERIS. La méthodologie procède de 4 étapes :

1- **Identification** des dangers et **source**, toxicité, outils disciplinaires à mettre en jeu.

2- Evaluation du risque, relation dose-effet, mesure de la gravité, mesure de la probabilité d'occurrence, évaluation des facteurs aggravants ; outils principaux : statistiques, probabilités, objectivité relative.

3- Evaluation de **l'exposition** ; données sur la probabilité de contamination ou d'exposition au danger ; modélisation.

4- **Caractérisation** du risque : estimation qualitative et quantitative de la probabilité et de la gravité des effets susceptibles de se produire sur la population et sur l'environnement.

Démarche de Prévention (document DRIRE suite aux catastrophes Seveso 1976, Mexico 1984 et Bhopal 1985) :

1- **Prévention à la source** par la mise en œuvre des meilleures technologies disponibles afin de réduire l'ampleur des conséquences potentielles et d'en diminuer les possibilités d'occurrence (on relève la barre très haut, les petites entreprises ou les artisans sont hors jeu ou renoncent) ;

2- **Maîtrise de l’urbanisation** autour des installations à risques afin de limiter l’exposition des tiers aux risques dans les zones de danger sur la base des scénarios de référence (histoire ubuesque et catastrophe immobilière, PLU mis en défaut) ;

3- **Organisation de plans de secours** internes et externes sur la base des scénarios les plus pénalisants (risque d’attentat, chute d’avions) ; on relève de nouveau la barre.

4- **Information préventive** des populations afin qu’elles puissent adopter des réflexes d’autoprotection pour le cas où un accident devrait se produire.

Affinage des méthodologies et définition de l’encadrement et des responsabilités (en 4 points) :

1- Progrès d’ensemble par approche **exhaustive**, définition du périmètre, topologie, géographie ; liste de toutes les phases de la vie de l’entreprise (histoire) ; systématique des dangers pour la santé et la sécurité au travail. Approche évolutive : d’où on vient, où on va ou hiérarchisation des risques ; démarche visant progressivement à augmenter le niveau de sécurité dans l’entreprise.
2- Approche **participative** et méthodique (il s’agit de sensibiliser tous les acteurs) : les salariés (tous les personnels travaillant dans l’entreprise), les représentants du personnel (interfaces), la médecine du travail et les organismes de prévention.
3- Approche **objective** et reproductible : définition des critères ou paramètres (qualifiables, quantifiables), définition d’un seuil de significativité (différencier du bruit de fond).
4- Vers l’élaboration d’un **document unique** de Gestion des risques : mécaniques, chimiques, chutes, incendie, explosion, électricité, manutention, thermique, bruit, vibration, circulation (par rubriques) ; information, séances de « sécurité ».

Les acteurs du risque en environnement :

- **l’Exploitant** de la structure : produire une étude de dangers, mettre en place des mesures de prévention et de protection, établir un plan de secours interne (= POI ou Plan d’opération interne), alerter l’Administration, informer la population.

- La DRIRE (ou équivalent actuel représentant du **Préfet**) : examiner l’étude des dangers, proposer des prescriptions, indiquer l’extension des zones à risques létaux (les cercles Z1, Z2), examiner si la réglementation a été appliquée en cas d’accident…

- Le **Maire** qui doit prendre en compte les risques dans les documents d’urbanisme, dans les demandes de permis et arrêter les modes d’occupation des sols en Z1 ou Z2.

- La sécurité civile pour les Plans de secours : préparer l’information préventive, assister le préfet.

- Le **SDIS** (service départemental d’incendie et de secours) : intervenir, élaborer les plans, des exercices.

- Le Préfet de département : imposer les prescriptions, arrêter les plans de secours, assurer l'information des populations, informer les maires sur les périmètres, diriger le plan de secours en cas d'accident qui dépasse les limites de l'établissement.

Les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

Elles sont classées par rapport aux activités humaines (industrielles) et génératrices de pollutions et de nuisances pour l'environnement, on dit qu'elles présentent des impacts environnementaux. C'est le Ministère de l'Environnement qui est en charge de ce domaine. Il entretient avec les entreprises deux types de relation : la **relation de contrainte** (Loi sur les installations classées) et une **relation de partenariat** (accompagnement en matière d'amélioration). Une Installation classée est un équipement (entreprise généralement) qui présente un risque de pollution pour l'environnement en fonctionnement normal ou par accident.
Selon la gravité possible de la pollution résultante, l'équipement est classé en rubrique : Non Classé, Soumis à déclaration, Soumis à des servitudes Seveso. Chaque dossier fait l'objet d'un travail approfondi que l'on résume sous le terme « d'étude d'impact ». C'est une analyse (décret de 1993) qui quantifie, identifie et fait des propositions en matière de pollutions émises par une activité (y compris chroniques) en fonctionnement normal. C'est un outil technique de prise en compte des préoccupations environnementales. C'est un outil juridique car il met en lumière la responsabilité de l'entrepreneur et un outil d'information pour le public.

La référence[6] en matière d'ICPE est la loi du 19 juillet 1976 et son décret du 21 septembre 1977 (approche intégrée, process, stocks). La loi fixe le régime d'autorisation ou de déclaration selon le type d'activité et le volume d'activité. La loi fixe des obligations (étude d'impact), des sanctions aux infractions, des dispositions relatives aux conditions d'exploitation, un classement des activités par rubriques avec des plafonds de pollution fixés selon les activités. L'organisme vérificateur est la DRIRE (et successeurs = DREAL).

Il y a 3 types d'installations : les dangereuses ou assez dangereuses soumises à déclaration, les installations dangereuses soumises à autorisation (étude de dangers), les installations dangereuses dites Seveso.

Les **Directives SEVESO**, sous forme de rappel succinct.

- **Directive SEVESO I** (82/501/CEE) qui concerne les Risques d'accidents majeurs de certaines activités industrielles (l'Europe rattrape et digère la loi française relative aux ICPE ; mobilisation des acteurs pour la prévention). La Directive est applicable depuis le 8 janvier 1984 pour les nouvelles installations et au 8 janvier 1985 pour les installations existantes. En droit français, la directive est appliquée au travers de la loi du 19 juillet 1976 relative aux ICPE, du décret d'application du 21 septembre 1977, des Instructions du Ministre chargé de l'environnement aux

[6] Le « Grenelle Environnement » a débouché sur un encadrement plus détaillé et plus « serré » des ICPE. Les engagements (numérotés) du Grenelle ont débouché sur des lois appropriées (2009, 2010, 2011).

Préfets du 28 décembre 1983 à propos du fonctionnement propre des installations visées, du contenu à attendre des études de dangers, de la prise en compte d'événements d'origine externe (inondation, orage, grêle, séisme, chute d'avion, malveillance). Suit une Circulaire le 8 octobre 1984 à destination des Préfets pour établir l'inventaire des installations relevant de ces dispositions avec instruction de la tenir à jour et remontée au Ministère.
Les **principes de base** de SEVESO I sont les suivants : **1. Définition de l'accident majeur** = événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion de caractère majeur, en relation avec un développement incontrôlé d'une activité industrielle entraînant un danger grave, immédiat ou différé pour l'homme, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement et/ou pour l'environnement et mettant en jeu une ou plusieurs substances dangereuses. **2. Mesures de prévention et de protection vis-à-vis de la population et de l'environnement** ; surveillance des activités et des installations. **3. Communication aux autorités** de la nature des activités dangereuses, des substances dangereuses et des situations éventuelles d'accident majeur de manière à ce que les autorités puissent élaborer un plan d'urgence, puissent exercer un contrôle. **4. Information du public et des travailleurs** sur les mesures de sécurité et instructions en cas d'accident. **5. Information d'État à État** voisin pour ICPE frontalière ; contribution à l'harmonisation des législations pour limiter les distorsions de concurrence.

- **Directive SEVESO II** (96/82/CE) du 9 décembre 1996. Elle concerne la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. Publiée le 14 janvier 1997, applicable à compter du 3 février 1997. Elle vise à renforcer le dispositif de prévention des accidents (étude des dangers[7] à actualiser tous les 5 ans) et à introduire des mesures complémentaires consacrant les bonnes pratiques en matière de gestion des risques (disposition sur l'utilisation des sols en vue de réduire les conséquences d'accidents ; prise en compte des aspects organisationnels de la sécurité ; amélioration du rapport de sécurité ; renforcement de la participation et de la **consultation du public**). Enfin, elle vise à renforcer les contrôles (test de l'efficacité du système en place, transmission des infos à une base européenne).

Les Enquêtes publiques et les pratiques de « double langage » (consultation du public).

Les responsables parlent souvent un double langage : l'environnement est le parent pauvre des projets, mais les projets visent chaque fois à une valorisation environnementale plancher.
Le public est indifférent dans les périodes d'enquêtes où il est par définition opérationnel et potentiellement efficace, ou se glisse dans des défilés dont la volonté musclée est de conserver le site en l'état et de confisquer le progrès à nos enfants.

[7] Étude nécessaire avant enquête publique et autorisation d'exploiter : c'est une analyse des dangers, des accidents, des risques, des produits, des mesures en cas d'accident. Elle est descriptive et corrective ; elle est analysée par un inspecteur des ICPE.

Le Risque par l'exemple :

Bactériologie, microbiologie générale, écologie microbienne et applications

Risque alimentaire : Alimentation, Intoxications - Intoxinations

Nos aliments sont évidemment aussi des aliments pour les microorganismes qui consomment, croissent et « défèquent » dans notre assiette au moment où nous nous mettons à table.

Les méthodes traditionnelles anciennes permettaient de limiter la colonisation bactérienne sans excès de produits chimiques ; c'était le temps[8] des soupes, du salage, du saumurage, du fumage, du séchage (dessiccation), du sucrage, des baumes et résines, de l'usage d'acides et d'alcools (vinaigre, yaourts, vin, bière) *etc*., où l'empirisme ne garantissait pas souvent l'absence d'accidents, mais les conséquences en étaient limitées. Aujourd'hui, seule l'échelle du risque a changé, mondialisation oblige.

Depuis Alexandre le Grand (350 ans av JC), l'humanité a l'expérience de grandes épidémies, de grandes intoxications, de grandes famines, de maladies hydriques à échelle continentale (dysenterie, typhoïde) et autres grandes ravageuses qui avaient pour effet d'éliminer des pans entiers de population et de les recentrer sur de petits effectifs. Les voyages et les croisades ont donné de bonnes occasions aux bactéries de causer des désastres. Louis IX (Saint-Louis, on disait la peste ou les pestes pour tout fléau) pourrait témoigner. Les Romains construisaient des aqueducs pour amener l'eau pure, les grecs résinaient les vins. Pythéas le Marseillais revenait de Suède avec une recette de liqueur d'orge fermentée et des souvenirs de glaçons géants flottant sur l'eau ; personne ne l'a cru. De tout temps, l'usage des métaux est complice de la cuisine (pots en argent, en étain, cuisine dans le cuivre). Le **cuivre**, le fait de **cuire** et l'usage de **l'eau bouillie** (thé), l'eau de vie contre l'eau de mort et les épices faisaient passer à moindre risque les plats faisandés.

L'agriculture aussi pratique la microbiologie empirique depuis que l'homme nomade est devenu sédentaire (Néolithique) avec le travail du sol, les ruminants, les légumineuses, l'amendement, le chaulage, l'écobuage, les fumiers, le compost, le purin, l'ensilage.

Manger sain n'est pas manger stérile ; surtout pas. Manger bio ne met pas à l'abri. Beaucoup d'intoxications alimentaires sont perçues à juste titre comme des empoisonnements (champignons, ergot du seigle, mycotoxines, aflatoxines, patuline de *Penicillium*). Néanmoins, on peut distinguer des **infections alimentaires**, qui correspondent à un envahissement du système digestif par des bactéries indésirables qui deviennent toxiques par leur nombre et les produits de leur métabolisme, (souvent

[8] Le temps des méthodes empiriques avec : la conservation par la fermentation alcoolique (boissons fermentées), éventuellement la distillation, par la fermentation lactique (produits laitiers et dérivés, choucroute) ; la conservation par l'acidification (vinaigre, petits légumes, lait) ; l'affinage (fermentations diverses, salage, ensemencement, saumures, fromages) ; le salage, le salpêtre, le sucrage, les confits, les sirops, les confitures ; le fumage (à la créosote) ; la dessiccation ; le froid ; l'appertisation.

d'ailleurs ces bactéries sécrètent des toxines), des **intoxications alimentaires**, qui correspondent à la consommation d'aliments souillés par des bactéries pathogènes qui sécrètent des toxines une fois installées dans l'intestin. Enfin, les **intoxinations** (à clostridies par exemple) correspondent à la consommation d'aliments qui contiennent la toxine[9], souvent bactérienne ou fongique : dans ce cas, la présence du microorganisme vivant n'est pas requise.

Enfin, c'est systématiquement l'aliment qui est incriminé alors que c'est souvent le couple **eau-aliment** qui est en cause. 13.000 enfants meurent chaque jour de maladies dites « diarrhéiques » sans pouvoir faire le détail entre les origines, bon an mal an 5 millions.

Les *Clostridium*

De nombreuses clostridies sont pathogènes.
Le **botulisme** est dû à l'ingestion d'une toxine botulique (=botulinique) puissante préformée dans les aliments ingérés (maladie des saucisses, aliments récoltés au ras du sol) ; le facteur Aw[10] est ici déterminant ; maladie souvent mortelle par paralysie flasque et défaillance respiratoire (8 neurotoxines). Historiquement on se souvient de l'affaire des asperges servies par une châtelaine à ses invités, puis données au jardinier. On se souvient de l'histoire belge de la fête du village (Ellezele) et de la société de musique décimée par un ennemi invisible que Van Ermangem (1896) va découvrir dans un jambon. La bactérie à Gram positif est anaérobie obligée et forme des endospores très thermorésistantes et très contaminantes ; c'est un germe très fréquent du sol (tellurique, ubiquitaire) et des sédiments aquatiques. Le germe peut être présent dans des conserves insuffisamment stérilisées[11] ; le germe agit par sa toxine, synthétisée par la cellule végétative. Une centaine de cas/an aux États-Unis. L'incubation est de 18-24h avec soif intense et l'injection d'antitoxine est impérative. Les enfants sont des cibles plus exposées et plus fréquentes avec des aliments classiques comme le miel ou des aliments préparés pour le bébé. Nombreuses préparations artisanales en cause « stérilisées » dans des lessiveuses !
Les autres intoxinations à *Clostridium* correspondent le plus souvent à la **welchiose** à *C. perfringens* (12 toxines). C'est un germe indiqué comme agent de putréfaction associé à la gangrène. Le germe *C. perfringens* de type A est anaérobie strict, court, large et trapu, capsulé, non mobile, formant des endospores. La toxine est habituellement détruite dans l'estomac mais les bacilles peuvent passer dans l'intestin ! L'origine est à rechercher dans des aliments souillés cuits en bouillons, des viandes contaminées, des préparations carnées, des plats réchauffés. Diarrhée abondante, hypersécrétion. *Idem* avec les blessures souillées (plus de morts que les armes pendant les guerres).
Un autre *Clostridium*, germe émergent, est à redouter très prochainement : ***C. difficile***, connu depuis 1935, agent de colites pseudo-membraneuses (1977) avec cytotoxine. C'est un germe présent en faible

[9] Dans cet exposé, nous ne faisons pas de distinction (à tort) entre toxine et poison, de manière à traiter comme identique empoisonnement et intoxication (souvent les mêmes symptômes au début) ; c'est par exemple le styrène par Reding (ingestion journalière de doses d'élément rémanent) ou le DDT, des poussières qui donnent les mêmes signes que l'ingestion régulière par l'alimentation d'arsenic, de mercure, de plomb (gibier), d'étain (désétamage) entrés dans la chaîne alimentaire. L'intoxication classique (y compris aux colorants, aux vins, additifs et conservateurs) est à distinguer de l'allergie consécutive aux décharges d'histamine en réaction à la présence de molécules d'allergène (plumes, médicaments, colorants, antibiotiques).
[10] Aw = *Activity of water*, ou teneur en eau.
[11] Il faut respecter impérativement les 4 facteurs de stérilisation : température, durée, pression, vapeur d'eau.

quantité dans le gros intestin et/ou contaminant assez banal chez l'homme et des animaux d'élevage qui peut se développer après un traitement radical aux antibiotiques ; l'incubation est assez longue ; il se produit une diarrhée sanguinolente forte et la nécrose du côlon. Peut arriver après opération abdominale. Germe réputé de diarrhées acquises à l'hôpital et agent de contagion en maison de retraite.

L'agent du **tétanos** est à traiter à part (pas alimentaire), et la vaccination est à tenir à jour.

Enfin un mot des dégâts considérables au printemps du **botulisme aviaire** à proximité des décharges et des rivages.

Un mot sur les intoxications à *Bacillus*.

Elles ont souvent été sous-estimées pour la raison de bienveillance à propos d'un germe banal et plutôt bienfaisant. On ne croyait en effet qu'une seule maladie imputable au *Bacillus* : le charbon et la belle démonstration de Pasteur sur les moutons en 1881. Il y a quelques espèces du groupe *cereus* souvent thermophiles et donc sélectionnés par la température. On les retrouve parfois développés en « culture pure » sur des aliments spécifiques (riz) conservés à l'étuve pour plusieurs jours. C'est l'affaire des diarrhées consécutives à des repas en restaurants orientaux ou prétendus tels, peu scrupuleux. Ces germes produisent une entérotoxine protéique (émétisante), cytotoxique et nécrosante. De même, des *Bacillus* ont entamé une « partie de bras de fer » avec le technicien des procédés de stérilisation par la chaleur (appertisation, upérisation, UHT). Rappelons l'infusion de foin des vétérinaires assimilée au traitement de cheval !

L'intoxination staphylococcique

C'est une entérocolite aiguë ; elle est due à *Staphylococcus aureus* entéropathogène et survient dans un contexte de convergence de facteurs cumulés de négligence[12] (aliments préparés, hachés, mixés, sauces, laitiers, crémiers). Les microorganismes en cause ne prolifèrent pas chez le malade sauf exception (nourrisson). L'intoxication est souvent collective (communautés), la toxine préformée dans l'aliment provoque de violents troubles digestifs ; parfois s'ajoutent des streptocoques hémolytiques. La bactérie est cocciforme, à Gram positif, aérobie-anaérobie facultative, catalase+ ; c'est un germe commensal ubiquiste et saprophyte ; il agit par sa virulence et ici par son entérotoxine préformée dans l'aliment ; elle est exceptionnellement thermorésistante (1h à 100°C) et thermostable. 3 à 6h après ingestion, commencent les troubles digestifs avec vomissements mais peu ou pas d'hyperthermie. Conséquences rarement mortelles.

---

[12] Le scénario idéal serait un bord de plage, en fin d'après-midi ; la pause glace chez un marchand peu scrupuleux qui a trempé ses abcès dans la crème et sert des bouillons de culture à des enfants à peine sortis de l'insolation. L'entrée nocturne à l'hôpital est inévitable (environ 3-6 h après ingestion). Mais l'histoire drôle est celle du Boeing 747 dont les passagers reçoivent à 10.000m d'altitude un sandwich jambon préparé au sol par un cuisinier porteur de pustules aux mains. Après 2h, tout le monde volant est pris de diarrhée et le compartiment toilette ne suffit pas ; tout le monde fait la queue, pilote compris ! C'est la diffusion de la toxine TSST qui est en cause (= *Toxic Shock Syndrome Toxin-1*).

Listeria.

Listeria est un germe compliqué qui se faufile, provoque des bouffées épidémiques et disparaît (éclipse). C'est souvent la chaîne du froid rompue qui est en cause et les négligences du consommateur qui mange à même le pot et en plusieurs jours un aliment préparé et contaminé. **Rappelons que le chaud stérilise et que le froid inhibe**.
La recherche des germes contaminants est souvent de deuxième démarche : la *Listeria* est rarement soupçonnée d'emblée. Et on ne trouve que ce que l'on cherche : si les bactéries avaient la taille des girafes, on ne consommerait pas les rillettes contaminées (longueur, spécificité et coût des analyses).
Les *Listeria* font partie des bactéries ayant droit de vie ou de mort sur une entreprise (charcuterie dans la Sarthe, steak haché en juin 2011).

Toxi-infections vraies, Salmonelloses et autres maladies gastro-entériques.

Beaucoup de ces affections sont considérées comme d'origine alimentaire à risque d'été et sont en réalité liées ou véhiculées par l'eau contaminée (contamination fécale en toute saison). L'eau souillée contamine les aliments et l'aliment consommé ensemence l'appareil digestif de l'hôte ; les bactéries prolifèrent dans les meilleures conditions (on parle de bactéries pathogènes invasives) sans facteur limitant. Il y a alors expression de la virulence et du pouvoir pathogène. En général, il y a sécrétion d'exotoxines protéiques ou glucido-lipidiques avec manifestations pathologiques. On place ici les salmonelloses, shigelloses, les gastro-entérites à *E. coli* et quelques autres (entérobactéries plus spécifiquement mais éventuellement jusqu'à *Bacillus cereus*).
La salmonellose résulte de l'ingestion de diverses souches[13] (+ de 2500) de *Salmonella typhimurium* et/ou *enteritidis*. Les aliments les plus souvent en cause sont les crèmes, les glaces, les viandes, les volailles, les œufs ; la durée d'incubation très variable est de 8 à 48h ; on parle assez indifféremment à tort de salmonellose et de fièvre typhoïde (*S. typhi*) et on se souvient de l'aventure de la « Mary Mallon » aux États-Unis en 1900 (gardée en lieu sûr 23 ans), de l'affaire de la viande en boîte en 1964[14].
La salmonellose correspond à une gastro-entérite sévère, notamment chez l'enfant (lait en poudre contaminé, 1997) avec multiplication des germes dans l'organisme et colonisation intestinale (germe invasif) ; l'hémorragie est possible ; l'évolution est rapide et grave. Il faut, en général, une contamination massive de l'aliment (contamination au moment de l'abattage des volailles par exemple) avec parfois la présence de réservoirs (tortues, volailles, poissons d'ornement) ; de nombreux bacilles paratyphiques peuvent devenir typhoïdes. C'est le bacille d'Eberth, très mobile, à Gram négatif qui produit plusieurs **toxines**. On trouve les bacilles sur des denrées et aliments lavés à l'eau souillée ; on les trouve aussi dans les égouts, les champs d'épandage. Sauf cas rare, il n'y a pas de porteur sain ; la contamination par

[13] *Salmonella typhi* est agent de typhoïde causant des désordres intestinaux graves avec température très élevée, plusieurs toxines, complications et forte mortalité ; origine : eaux souillées, c'est typiquement une maladie dite d'origine hydrique.
[14] *Corned beef* produit en Amérique du sud, stérilisé à chaud puis refroidi rapidement dans de l'eau non chlorée ; le courant d'aspiration avant fermeture hermétique entraîne *Salmonella* dans plusieurs boîtes destinées à l'Écosse. Résultat : une épidémie qui touche 400 personnes. Il est temps de rappeler des bons usages à propos de conserves en se référant aux travaux de Nicolas Appert, confiseur en 1795, préconisant de chauffer à l'eau bouillante et de sceller les aliments carnés dans des ampoules. Travaux repris et explicités au temps de Louis Pasteur avec toutes les déclinaisons de températures pour pasteuriser (le vin) ou stériliser. Et méfions nous de l'idée reçue qui assimile toxine et bombage de boîte ; c'est souvent de l'azote de dénitrification mais toute boîte présentant un défaut est éliminée.

les éviers est monnaie courante. La culture est facile. L'analyse demande 3 à 4 jours. Les eaux gardent leur pouvoir contaminant longtemps après la disparition des troubles.
Les salmonelles sont des moteurs de recherche de tests rapides (42h pour le *Salmonella* Rapid Test) ; le problème, c'est que chaque nouvelle méthode n'efface pas l'ancienne qui est la référence et la norme ; il y a donc un travail de mise à jour sur le sujet. Elles sont aussi des moteurs de recherche pour la compréhension de l'effet barrière, la notion de porteur sain et la vaccination. Disons que l'on recherche des bactéries à administrer qui limiteraient la colonisation par les germes pathogènes (nouvelle génération d'antibiotiques) ; la réponse est oui, par exemple *Lactobacillus acidophilus* des laits fermentés qui sécrètent des bactériocines antiseptiques. Les salmonelles sont enfin des « animaux de laboratoire » pour le test de Ames (suspicion de substance cancérigène).

Gastro-entérites à *Escherichia coli* et Colimétrie.

Les colibacilles et les coliformes sont des germes résidants, saprophytes et commensaux de l'intestin de l'homme et des animaux à sang chaud. Plusieurs genres, espèces et sérotypes assez ordinaires causent des maladies variables en déclinant le modèle de la gastro-entérite et des toxicoses (GEI mortelle de l'enfant). Les germes peuvent aussi être en cause dans des épidémies en communautés, crèches et nurseries. Ce sont des germes invasifs qui peuvent changer de tropisme (urinaire).
Escherichia coli est une bactérie banale et polymorphe, mobile à Gram négatif ; sa culture est très facile ; il produit plusieurs toxines dont une exotoxine neurotrope et une endotoxine entérotrope (antigène O) ; il y a présence de colicines. Le Groupe *Escherichia coli* est devenu avec le temps à la fois le principal animal domestique et industriel « de compagnie » de l'homme (au sens collectif de l'humanité) et à la fois le plus grand danger pour sa santé (pour le coup c'est sa diversité par sa variabilité qui pose problème).
Ce groupe mérite un petit développement et un petit rappel en introduction. Mon petit article de mars 2010[15] indiquait une réponse positive sous la question « y aura-t-il d'autres populations prochainement dans nos assiettes ? ». « *En premier les Escherichia coli dont on commence à comprendre la dangerosité (…). Il en est d'entéro-hémorragiques* ». Et je parlais aussi du danger à venir des nouvelles stratégies mises en place par les bactéries de ce genre pour détourner nos moyens de lutte (confisquer le fer, les adhésines, *etc*). Avec la crise sanitaire que l'Europe a connue à la fin du printemps 2011 (« concombre allemand »)[16], nous sommes exactement dans ce scénario, sauf que cet *Escherichia* « allemand » a cumulé toutes les ruses connues pour nous jouer un tour.
Escherichia est très original au plan génétique : bien évidemment, il croît comme la plupart des bactéries de manière exponentielle quand les conditions sont non limitantes, mais surtout, il est capable de produire des cellules génétiquement différentes (faiblement différentes) selon les conditions de croissance, aussi bien au plan généalogique (vertical) des générations cellulaires qu'au sein des populations en présence à l'instant *t* (conjugaison bactérienne et transfert de plasmides).
Escherichia est d'habitude inoffensif de l'hôte dans la sphère entérique.

[15] Publié sur le site du Programme Lascaux.
[16] V. mon billet du 2 juin 2011 publié sur le blog du Programme Lascaux, qui traitait, sous forme de commentaire et d'explications, de l'affaire qui a touché le nord de l'Allemagne en faisant des dégâts « concombre-latéraux ». J'indiquais qu'il s'agissait d'une « Crise aiguë originale ».

Petit rappel de génétique et de métabolisme chez les bactéries :

Nous faisons à propos d'ADN une différence essentielle entre l'aliment et le patrimoine génétique. Les bactéries ont plus de difficulté ou de malice ! Elles font un mixage du « bien manger » et « bien se reproduire » trop subtil pour notre compréhension aujourd'hui. **Les bactéries fonctionnent généralement en 2 temps** :

1. Le métabolisme de croissance (« M I » ou anabolisme, synthèses, biomasse) et colonisation.

2. Quand l'espace et l'énergie commencent à manquer, le métabolisme passe en « M II » ou métabolisme de relation et de protection. Le génome bactérien évolue aussi et dans le même sens :

- ❖ Répliquer le chromosome et, si la croissance est exponentielle, on peut voir des cellules minimum (c'est la **génétique au plan vertical**, de mère à fille, ou produire un génome identique, conforme ou à l'économie, au plus court du nécessaire) ;
- ❖ Construire et exprimer un génome de relation, de compétition, d'acquisition, de défense (**communication essentiellement horizontale** par nombreux mécanismes comme la transformation, la conjugaison, la transduction, la contamination, la transposition) ; la communication est intra-spécifique, interspécifique, voire inter-générique (c'est un peu comme les habitants d'une même rue qui se passent le même journal ; chacun y retiendra ou pas les informations qu'il juge utile).

Autre originalité : le cycle chromosomique bactérien (réplication) est plus court que le cycle cellulaire (scission) ; il peut donc y avoir à l'instant *t* 1,5 ou 2,2 chromosomes dans une cellule normalement haploïde qui va ou vient de se diviser ; parfois 1,3 ou 1,7 !

Pour le médecin hospitalier bactériologiste, il est clair que le genre *Escherichia* est la bête noire et le caméléon du quotidien ; il sait que le groupe tue en moyenne 15.000 enfants/jour dans le monde et que l'hygiène, l'alimentation, l'eau, la contamination directe et probablement bien d'autres pièges peuvent disséminer les germes de porteur à victime, d'objet souillé à consommateur, en des temps records. Voici un exemple tristement célèbre : la diarrhée des voyageurs, plus simplement appelée « *tourista* », souvent brutale est presque toujours imputée à des souches *d'Escherichia coli* inconnues jusque-là du « voyageur-consommateur », simplement ingérées avec les aliments, et compétitrices de sa propre flore entérique. Les dialogues de flores sont spectaculaires, le rapport de force agité et le patient s'en souvient.

Escherichia coli a remplacé le chien, le cheval et la souris au laboratoire, souvent sélectionné sur ses caractères originaux. J'ai souvent posé à l'examen de Microbiologie générale la question de dresser le portrait d'une bactérie évoluée. Et, bien évidemment, j'avais quelques copies blanches, sauf que beaucoup d'étudiants traitaient *d'Escherichia coli* ou de *Pseudomonas* à juste raison. Collectivement, les bactéries ont plus de 3 milliards d'années de présence terrienne (nées dans l'eau) et je ne sais toujours pas reconnaître au premier coup d'œil une bactérie jeune d'une bactérie âgée, une bactérie en pleine activité et une bactérie au repos, une bactérie vivante d'une bactérie morte. Alors, une bactérie évoluée, c'est une bactérie comme *Escherichia coli*, qui s'est adaptée aux modifications du milieu naturel et aux acteurs de la biosphère jusqu'à se laisser aller à être prise en charge pour le gîte et le

couvert. Dans ces meilleures conditions de confort, il arrive que la bactérie assure sa descendance en 20 minutes alors que la jeune fille le fait à 20 ans (à la même horloge).

La recherche des **coliformes** est simple, techniquement parlant et compliquée au sens de l'objectif recherché. Il s'agit d'une technique de 3 cercles concentriques : les coliformes recherchés dans un échantillon (prélèvement) sont les plus banaux, les plus simples et robustes (*Klebsiella, Enterobacter, Citrobacter, Aerobacter*) qui survivent bien dans le milieu extérieur. Dans le cercle intermédiaire, pourraient figurer des *Escherichia* et des germes plus fragiles, inféodés à l'hôte vivant. Dans le plus petit cercle, central, sont redoutés *Salmonella, Shigella* et des *E. coli* particulièrement dangereux. Quand une analyse montre 50.000 coliformes/ml, on peut soupçonner la présence de *Salmonella*.

La **colimétrie** vise à dénombrer les coliformes/unité d'échantillon ; elle s'appuie sur la présence de coliformes qui signent une contamination fécale. Les germes d'accompagnement d'*E. coli* sont *Klebsiella, Enterobacter, Citrobacter*. Jusqu'aux années 1970 on considérait les coliformes comme de bons **indicateurs**[17] indiscutables de contamination fécale, un vrai risque pour la santé à rechercher impérativement dans tout type d'eaux. Pour être plus simple, disons que les coliformes sont tellement « faciles » qu'ils répondent aux critères de « bons indicateurs », à savoir : être présents dans tous les cas de contamination, être faciles à cultiver et à mettre en évidence (techniquement) ; répondre à une démarche de recherche simple, « mécanique » et sans danger, spécifique en jouant sur le métabolisme facultatif ou alternatif pour gagner du temps (anaérobie dans l'intestin et aérobie sur le milieu de culture). La technique doit pouvoir donner une évaluation quantitative correcte.
La remise en cause du principe remonte à 1973 (OMS), notamment à propos de la durée très variable de survie de nombreux coliformes dans le milieu extérieur. Les coliformes sont-ils de bons indicateurs pour tous les pays, sous tous les climats ? Non. Depuis la convention de Berlin, on distingue les coliformes totaux (37°C) des coliformes fécaux (plus ou moins assimilés à thermo-tolérants).
Les spécialistes et les experts ont préconisé comme plus fiable la recherche des entérocoques ou streptocoques du Groupe D. Ce sont des indicateurs de contamination fécale (hôte peu précis) dont la survie est prolongée dans le milieu extérieur ; ils résistent à de nombreux traitements et inhibiteurs. Ce sont des germes rustiques à Gram positif, saprophytes et souvent opportunistes. La recherche de ces bactéries se déroule en 3 temps : test présomptif, test confirmatif, test démonstratif (catalase-). Ce test est appliqué notamment à l'eau de mer pour évaluer sa qualité.

Diarrhée à *Yersinia enterocolitica*.

Le genre *Yersinia* est dédié à Yersin, qui a isolé le bacille de la peste en 1894 (*Y pestis*). Cette autre espèce est identique à *E. coli*, mais c'est un autre germe de GEI présent dans des viandes contaminées ; il est très hétérogène et présent chez de très nombreux porteurs (rongeurs, animaux, porcs, eaux) ; c'est un germe en devenir pour nous, hélas, agent parfois de manifestations digestives graves, voire de septicémies ; c'est le cas aussi de *Proteus*, hôte accidentel de la flore intestinale, très protéolytique et causant des troubles intestinaux souvent graves ou des surinfections.

---

[17] On peut légitimement se poser la question de savoir ce qu'est un bon « bio-indicateur ».

Shigellose.

C'est une toxi-infection grave très épidémique que l'on appelle dysenterie bactérienne (*Shigella dysenteriae*). La bactérie est très invasive, elle est courte et épaisse, immobile à oscillations pendulaires ; sa culture est facile, le germe est fragile ; elle produit une entérotoxine et une neurotoxine (*Shiga* toxine entéro et neuro toxiques, *Vero* toxine cytotoxique destructive) très active ; ce sont les aliments souillés et les eaux des régions tempérées aux mois d'été qui sont en cause ; le seuil infectant est très bas (10 à 100 bactéries) ; la contagion se produit par les malades ; il existe des porteurs sains. Attention aux denrées humides, aux égouts, aux rizières. La maladie se traduit par des diarrhées très nombreuses et des douleurs abdominales ; signes nerveux et généraux, asthénie, anorexie ; l'évolution vers la guérison est souvent retardée par des complications comme la destruction cellulaire ; la mort peut survenir sans traitement (sulfamides et antibiotiques).

Diarrhée à *Campylobacter jejuni*.

Bacille courbé à Gram négatif, présent dans l'intestin des poulets, dindes et bovins ; incubation de 2 à 10 jours ; entérotoxine qui ressemble à celle du choléra. Entérite des enfants. Infection orale. Culture à 43°C. 2 millions de cas/an aux États-Unis.

Gastro-entérite à *Vibrio parahaemolyticus.*

Germe présent dans toutes les mers du monde ; accidents graves suite à la consommation de fruits de mer (70% des cas), diarrhées aiguës chez l'homme ; incubation de 2 à 48h ; action entéro-invasive avec toxine. Quelques accidents également avec *Aeromonas*. Le germe est connu depuis 1951 (épidémie au Japon), retrouvé comme fréquent dans les eaux côtières et dans les estuaires du monde ; il est plus ou moins halophile, plus sensible à la réfrigération qu'à la congélation !

Attention danger avec l'émergence de ***Clostridium difficile***

Agent de colites chez les jeunes enfants et les nouveau-nés présentant des diarrhées associées à des traitements antibiotiques. Ce germe se retrouve aussi plus tard chez l'homme ayant consommé des produits animaux traités aux antibiotiques et contaminés (porcs ?).

Je ne traite pas les gastro-entérites virales (fulgurantes et généralement peu graves) et les hépatites assez énigmatiques. On dit que moins de 1% des hépatites sont attribuées à l'eau souillée (séparer l'hépatite A, digestive, entérique, avec les coquillages en cause, l'hépatite B de cirrhoses et cancers ; l'hépatite C ou non A non B énigmatique, bombe à retardement, pas de vaccin ; l'hépatite D, aiguë ; l'hépatite E, entérique à transmission fécale ; la journée mondiale de l'hépatite était le 16 octobre 2011).

Conclusion partielle

1. la massification n'est pas un risque, c'est une certitude avec grand danger[18] à la clé d'un accident à grande échelle. Les techniques industrielles ont fait leurs preuves mais :

- Elles peuvent connaître une défaillance, un incident, une erreur dans les paramétrages.

- Elles sont efficaces à partir de l'instant *t* jusqu'à ce que la parade bactérienne se manifeste.

L'amateurisme, l'empirisme et l'habitude sont des mauvais conseillers. Baisser la garde est, sans surprise, cause de drames. Des aliments sont particulièrement en cause dans les accidents et ce sont principalement les préparations (manuelles), les liants (eau, sauces), les hachis, les aliments carnés et laitiers, les conserves domestiques qui sont les principales sources d'accidents graves.

2. Notre prévention tient la sécurité alimentaire et retentit sur la qualité alimentaire (dimensionnement et surdimensionnement des technologies) ; bref je vous envoie la balle pour trouver un juste milieu entre l'échelle industrielle, la massification et la qualité sans risque. Formation et responsabilisation sont maîtres mots et plus importants que de monter les manomètres.

3. Le péril fécal n'est pas imaginaire ; c'est un risque perpétuel, récurrent et épisodique, on parle de crises qui agissent comme des piqûres de rappel. Il incite à des études intéressantes avec des enjeux économiques considérables : trouver de bons indicateurs, les trouver vite ; réaliser des tests *in situ* avec peu de matériel (zoom). Les chercheurs explorent aussi l'espace et le temps : y a-t-il des zones géographiques à risques (oui), des circonstances à risques (oui), des périodes où nous sommes plus vulnérables (oui) ; la chronobiologie s'y intéresse.

4. Selon les vagues de toxi-infections alimentaires et TIAC, la société se pose la question de modifier les DLC (« date limite de consommation » - de 42 jours à 29 jours selon les produits). Il y a là matière à intervenir pour que notre équipe restreinte prenne les choses en main (déterminer la DLC et toutes les autres dates indiquées ; DLUO = date limite d'utilisation optimale). Rappelons que les normes AFNOR en la matière tiennent compte du calcul de la durée de vie microbiologique.

5. Les « mouchards » des produits alimentaires sont plus discrets que les radars des routes. Les puces-étiquettes (origine Monoprix) sont des pastilles qui attestent de la chaîne du froid ou dénoncent sa rupture ; il s'agit du virage d'indicateurs au di-acétylène si la température du produit remonte (par polymérisation).

[18] Le danger est un péril fécal ou un péril viral, sauf que la moitié des intoxications alimentaires est d'origine inconnue. En simplifiant à l'extrême, disons que la défaillance consiste à cloner les aliments et les ensemencer de germes multi-résistants.

Risques hydriques

Eau, Environnement, Pollution, santé et maladies hydriques 1.

Les risques hydriques sont considérés comme le **risque majeur à venir** d'autant que l'eau va manquer et que l'eau constitue souvent le réservoir final des activités des hommes, germes pathogènes compris. Les accidents à grande échelle sont inévitables très prochainement.

Epuration des eaux, objectifs et incohérences. Il s'agit de laver notre eau sale pour faire de l'eau propre en espérant que nous allons vers le tri des eaux sales afin que nos eaux sales soient de plus en plus propres. Nous lavons tout avec de l'eau, l'eau exceptée ; les professionnels de l'épuration sont les bactéries. L'objectif de l'épuration est de rendre une eau satisfaisante au milieu naturel en s'inspirant des systèmes vivants (naturels). L'épuration biologique utilise des méthodes biologiques (douces) *via* les êtres vivants, mais les méthodes « abio ou physico-chimiques » vont être nécessaires comme appoint ou renfort. Nous illustrerons le thème par une succession de principes.

S'inspirer de modèles naturels. L'épuration **naturelle** est principalement passive, liée aux phénomènes physiques ; c'est la percolation, la congélation ou la distillation par exemple. Faire de l'eau douce avec de l'eau de mer, c'est de la compétence de l'océan et des climats ; la planète consacre environ ¼ de son budget énergétique à distiller (évaporation) l'eau salée à température basse (15°C). Faire de l'eau de rivière, de lac ou de nappe avec de l'eau de pluie, cela relève des reliefs et de la géographie, de la nature des sols (pente, composition, perméabilité, porosité) ; l'eau de percolation transporte plus ou moins de matières en suspension et de matières dissoutes. L'épuration naturelle est aussi biologique ; c'est souvent le recyclage de la matière contenue dans l'eau ; **l'épuration naturelle de l'eau appartient donc beaucoup plus au cycle de la matière qu'au cycle de l'eau.** L'épuration naturelle est l'apanage du règne végétal ; la plante consacre la moitié de son budget énergétique à l'absorption de la solution du sol, à la conduction des sèves et à l'évaporation. Et nous ne savons pas grand-chose de l'évaporation biologique de la surface des océans.

L'épuration **chimique** est surtout l'affaire des chimistes ; elle se pratique au laboratoire ou à l'usine par échange ionique, chélation, floculation ou précipitation avant recours à un procédé physique comme la filtration ou la centrifugation.

Le principe de **l'auto-épuration** est écologiquement fondé, mais relégué au rang de mythe. L'eau sale ne s'épure pas seule dans le milieu naturel. Elle a besoin d'un endroit (installation, géométrie), de substrats biodégradables, d'acteurs efficaces, de relais et de facteurs favorables. L'épuration linéaire en milieu lotique (rivière) peut rester néanmoins un modèle convenable d'épuration qui doit inspirer nos systèmes d'application au traitement des eaux car il intègre les dimensions spatiale (distance, gradient, chaîne alimentaire, succession) et temporelle (durée, période, rythme) assez souples pour s'adapter à la sphère anthropique. L'auto-épuration est considérée par les biologistes comme horizontale, « au fil du courant » et se mesure selon la méthode naturaliste ou par la méthode savante. La méthode naturaliste compte en kilomètres le pouvoir épurateur de l'eau en considérant la distance comprise entre le point de rejet de l'effluent pollué et le point où l'on considère l'eau comme régénérée (indice de Wuhrman,

1972). Les études dans ce domaine conduisent à de nombreuses applications comme les champs d'épandage en milieu dunaire (décantation de type cuve verticale puis massif filtrant) ; nuisances potentielles (convection à cause des variations journalières de température). La phyto-extraction en marais artificiels ; après décantation primaire les effluents suivent un parcours de 5 bassins disposés en escalier ; on y trouve des macrophytes, des acteurs microbiens, des joncs, des roseaux ; l'application ponctuelle de la méthode prend le nom de phyto-remédiation de sites pollués (et friches) et de fertirrigation en sylviculture.

Epurer avec des germes épurateurs. Avec de bons germes épurateurs, on peut épurer toutes les eaux, propres comprises ! Ce sont principalement les bactéries et les protistes qui consomment la pollution ; d'où le théorème à garder présent : **rien ne sert de courir derrière les bactéries, mieux vaut leur garder l'envie au quotidien de consommer nos eaux polluées**. 1 litre de boues de bassin d'épuration en fonctionnement contient au moins 1.000 milliards de bactéries de tous âges d'une dizaine d'espèces dominantes avec beaucoup d'accessoires, 10 millions de cellules de protozoaires d'une dizaine d'espèces dominantes et 10.000 petits rotifères et nématodes de 2 ou 3 espèces dominantes. Les germes sauvages y sont plus performants que les germes anthropiques ; ils sont robustes, rustiques, ubiquistes, plutôt terrestres d'habitat, mésophiles, mésotrophes et neutrophiles. Leur valence écologique est souvent large. Leur capacité d'adaptation est grande et les facteurs limitants négligeables. Les bactéries épuratrices sont assez jeunes, bien réparties entre les germes à Gram positif (*Bacillus*, *Micrococcus*, des corynébactéries) et les germes à Gram négatif à tout faire comme les *Pseudomonas*, des *Zoogloea*, des *Xanthomonas*, des *Alcaligenes* ou des *Flavobacterium* avec des polyvalents comme *Aeromonas* et les énigmatiques *Acinetobacter*. On y trouve aussi des filaments mycéliens, des actinomycètes, des bactéries coloniales, des cyanobactéries, des bactéries algaires et des entérobactéries. Dans la mousse, l'écume ou en surface, il peut y avoir des germes potentiellement dangereux comme *Nocardia* et des entériques. Les protistes épurateurs sont variés et représentent 5% du poids sec des boues ; ce sont des Flagellés et des Ciliés (bactériophages vrais) à géométrie caractéristique nageurs ou brouteurs ; ils travaillent un peu comme dans la panse des ruminants à consommer des pans entiers de populations bactériennes et en stimulant donc leur renouvellement. Ils peuvent filtrer plusieurs fois par jour la quantité d'eau du bassin et il arrive que le carbone puisse manquer. Quelques vers, des nématodes et des rotifères complètent le haut de la chaîne microbienne.

L'inventaire statique n'a pas d'intérêt[19] ; l'inventaire dynamique (fonctionnel, rendement) est impératif. Tous les acteurs sont disposés comme les maillons d'une chaîne alimentaire dite syntrophique ; ils transforment la matière polluante dans une gestion amphibolique du métabolisme, de la croissance et de développement ; l'oxygène peut être limitant. Le fonctionnement bactérien joue donc davantage sur la synergie que la compétition. Attention, cette vue globale des acteurs de l'épuration peut facilement basculer dans un scénario « d'intestin à ciel ouvert » à la faveur d'opportunistes totipotents, de multi-résistants et de germes anthropiques. Autre dérive : les mutants ; sachant que l'on compte 1 mutant bactérien pour 100 million de cellules, nous savons que le bassin d'épuration peut dériver vers un bouillon de culture de germes qui communiquent génétiquement et varier jusqu'à nous poser des

[19] Comment identifier au coup d'œil un *Thiobacillus* d'un *Pseudomonas* ou d'un *Rhizobium*, voire d'un *Agrobacterium* ? Comment différencier une bactérie travailleuse d'une bactérie paresseuse, une bactérie vivante d'une bactérie morte ?

problèmes sanitaires. Partant de l'observation qu'il y a principalement une dizaine de groupes bactériens épurateurs issus d'espèces rurales, **nous serions bien inspirés de tenter la sélection, le dressage et l'ensemencement de levains** (cocultures) comme cela se pratique pour les vins et les fromages. Enfin, dans les boues, on peut trouver finalement ce que l'on appelle des « germes d'accompagnement », à savoir des contaminants robustes et mésophiles parfois inoffensifs (germes lactiques), parfois pas (*Legionella*).

Diversifier les solutions d'épuration. L'idée force est de diversifier les procédés et d'unir les moyens[20] (physique, chimie, biologie) : la technique **mixte**. Les solutions biologiques sont longues, parfois incertaines, sources de nuisances et de dysfonctionnement récurrent ; pourtant ce sont les plus courtes pour le retour à la nature d'une eau de bonne qualité. En France, il y a 3 familles de procédés qui disposent d'une bonne expérience et d'un capital confiance :

1. Les boues activées, système ancien (Londres 1914), le plus répandu en France depuis 1948, 71% dans la Somme, conçu selon le modèle de la culture microbienne aérobie intensive (bouillon de culture) de populations bactériennes en croissance floculée (grumeaux, flocons) ; le technicien doit veiller à l'oxygène (facteur limitant) et à l'équilibre entre germes sauvages et germes anthropiques ; le procédé vise un rendement compris entre 70 et 95% de la matière de l'effluent issu du traitement primaire ; les incidents principaux sont la formation de suspensions hétérogènes et les flocs. Les eaux agitées sont mises à reposer après traitement dans un clarificateur (décanteur) auquel on peut adjoindre un dégazeur ; la décantation sépare les effluents surnageant épurés des boues secondaires dites organiques qui sédimentent (biomasse microbienne + matière organique). Mais **laver l'eau dans l'eau, est-ce une bonne idée ?** Chacun sait que les bactéries sont malhabiles dans l'eau.

2. Les lits bactériens : les levains épurateurs sont fixés sur des supports variables (concassats, galets, cailloux, billes, polymères, graviers) dont la géométrie[21] est déterminante pour assurer un volume minimal et une surface d'échange maximale. Les supports forment des lits d'épaisseur variable (environ 10cm) et juxtaposés en batteries. Les levains qui ont besoin d'un appui (stéréotropisme) colonisent les supports en formant un biofilm (zooglée) qui reçoit par aspersion (de haut en bas) et ruissellement les effluents pollués à traiter ; une ventilation d'air alimente le système à contre-courant (de bas en haut) ; les flores sont généralement diversifiées avec *Xanthomonas* (12%), *Acinetobacter* (30%), des nitrobactéries diversifiées, des *Flavobacterium* (10%), des *Aeromonas* (7%), des *Paracoccus*, (1 à 9%) des *Pseudomonas* (7 à 15%), des bactéries formant des zooglées (*Zoogloea* 7%), des *Achromobacter*, des *Arthrobacter* et des entérobactéries (variable jusque 12%). On y observe aussi des champignons (risque de feutrage), de nombreux protistes, nématodes, rotifères, vers, limaces, arachnides, escargots et des larves d'insectes ; la micro-biodiversité y est donc souvent manifeste, entretenue sinon exubérante ; meilleure que dans la « soupe ». Les lits sont assemblés en batteries assez souples et mobiles (amovibles) pour faire varier le dimensionnement (volumes filtrants), la durée d'exposition, la teneur en oxygène diffusible (oxydation prolongée et respiration endogène alternée) et le débit. C'est surtout l'ajustement du dimensionnement des surfaces d'épuration au quantitatif

---

[20] On imagine volontiers que ce n'est pas en ajoutant 17 produits chimiques à un effluent pollué que l'on va obtenir de l'eau propre.

[21] Les lits modernes sont alvéolaires et disposés sur des supports synthétiques dont la géométrie des volumes est calculée et modélisée par ordinateur.

périodique d'effluents qui est l'avantage du système. Pour son principe de modèle plutôt tellurique (plan, sol) et comparativement, à paramètres similaires, le procédé des lits bactériens montre un rendement épurateur supérieur à celui des boues (carbone et azote). Néanmoins, pour cause d'entretien régulier, de surveillance du colmatage, de la régénération périodique et de sa tendance à favoriser des germes anthropiques, des germes d'interface, le procédé reste à diffusion restreinte ou appliqué à des collectivités modestes. Avant de rendre l'eau épurée au milieu naturel, un traitement d'abattement de densité des populations microbiennes est rendu nécessaire (chloration – déchloration ou autre).

La variante des disques biologiques et des biofiltres permet en principe plus de souplesse dans le fonctionnement. Il s'agit de disques rotatifs en batteries sur un axe permettant d'adapter la vitesse de rotation et la hauteur du disque immergée dans la liqueur. On procède généralement à une épuration syncopée qui permet de jouer sur l'oxygénation des phases de traitement et sur l'égouttage du trop plein d'eau. On constate des densités élevées de *Klebsiella*, de *Micrococcus* et de *Flavobacterium*, sachant que *Listeria* (suspect) n'est jamais absent et en compagnie d'agrobactéries (utiles, 10%). Le même principe des biofiltres peut trouver de nombreux dispositifs techniques qui permettent de décliner le mixage des atouts tellurique et aquatique de l'épuration biologique. Ce sont des lits filtrants, des lits fluidisés et des systèmes moins élaborés ou plus rustiques inspirés de la phytofiltration.

3. Le lagunage (et les lagunes) s'inspire du modèle naturel de dépollution par le règne végétal et l'observation du fonctionnement des lagons. Il peut être la solution unique de traitement ou la solution finale en traitement tertiaire d'une installation complète. La solution nutritive terminale absorbée par les systèmes racinaires correspond essentiellement à l'eau épurée dont la matière a été minéralisée par les microorganismes. Cette eau est chargée de substances dissoutes que les plantes prélèvent (nutrition minérale), trient, répartissent et stockent en évaporant l'eau véhicule par les organes aériens. Dans sa version classique, bien adaptée à des collectivités jusque 1000 habitants raccordés, le procédé de lagunage prévoit 3 bassins étanchéifiés (lagunes, géo-membranes) disposés dans un ordre chronologique descendant. La lagune n°1 reçoit les eaux brutes dégrillées. Elle est assez profonde (1,50m à 1,80m) ; elle est dite à microphytes (microorganismes, microalgues) favorisant les *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Chromatium* et *Thiospirillum*. Cette lagune peut être équipée de turbines flottantes produisant un lagunage « dopé » sur mesure des entrées d'effluents et des variations quantitatives des facteurs du milieu (température). Plus grande est l'étendue d'eau et davantage se fait sentir l'effet biocide de la lumière sur les germes sensibles, voire indésirables. Les protozoaires jouent le rôle d'acteur principal de régulation (épuration vraie, filtration complète de la lagune) par réamorçage de la chaîne alimentaire. La dérive toujours redoutée est celle de l'eutrophisation d'une ou de plusieurs lagunes par excès de nutriments rendus disponibles aux producteurs primaires. La lagune n°2 est à macrophytes. Elle est peu profonde (40cm à 80cm) ; les techniciens ne sont plus autant favorables à la multiplication des îlots qui procurent pourtant des interfaces multiples utiles aux végétaux ; ils préfèrent jouer sur le temps de séjour en le maintenant au plus près de l'optimum (60 à 90 jours selon conditions). La lagune n°3 correspond à une sorte d'étang artificiel ou reconstitué (écosystème) où le choix des plantes est déterminant (iris, roseaux). Les bassins alternatifs sont toujours les bienvenus (au cas où) et permettent un entretien plus facile de l'installation. Les berges sont entretenues régulièrement (nuisibles) ainsi que les digues intermédiaires carrossables.

Les bassins doivent être curés régulièrement et dévasés. La végétation doit être fauchée et exportée. La dérive peut favoriser les champignons (hypothèse rare), les micro-algues et les cyanobactéries sobres et pionnières (fréquent) voire des pestes. Le lagunage s'inscrit bien dans le paysage ; il est peu coûteux (10% d'une installation à boues), rustique et efficace (70 à 90% d'épuration) ; il correspond tout à fait à des situations de traitement saisonnier (camping, station balnéaire) ou de petites collectivités en milieu rural ; souvent aussi, c'est la bonne solution pour une agro-industrie. Il peut engendrer par vagues (été) des nuisances en cas d'insuffisance d'entretien ou de surveillance ; il demande néanmoins une forte emprise au sol : on compte en moyenne 10m^2 de lagune par habitant ; une variante au fil de l'eau ou sur chenal, parfois dans des fossés (en anneau) donne des résultats assez moyens. Le lagunage s'est bien développé en France ; on compte environ 4000 installations, plutôt rurales soit 15% des STEP (station d'épuration).

Deux revers pour l'épuration et la purification : les STEP (station d'épuration) et la Bretagne.

La France s'est équipée de stations d'épuration progressivement à partir des années 50 – 60 et donc la plupart des stations ont plus de 40 ans et épurent à moins de 60% de rendement. Bref, ces stations sont vétustes et la tentation est grande de « rafistoler » ou agrandir les anciennes installations plutôt que concevoir un nouveau système plus adapté à la situation. C'est une grossière erreur, comme de construire une nouvelle station surdimensionnée pour d'éventuelles augmentations de population. La solution adoptée à Amiens (Ambonne) est originale : enterrer en presque totalité une station compartimentée et traditionnelle ; seul défaut : la concentration des effluents reste un risque majeur pour le fonctionnement optimum. La Bretagne a été très précocement sensibilisée à la qualité de ses eaux littorales et de rivières. Bon nombre d'études et d'essais ont démontré l'aptitude des rivières à régénérer une eau douce de qualité. La Bretagne est aussi terre d'élevage excessif et les travaux valorisant les solutions dépolluantes ont fait baissé la garde aux éleveurs qui se sont laissés aller à continuer comme avant et *patatra* : les rivières et le littoral renouent avec les phosphates, les nitrates et lisiers.

Accompagner les bactéries et les boues. Il faut aider les bactéries en station plutôt que les laisser se débrouiller dans des endroits construits par nous (camps de travail forcé) ; les bactéries trouvent rarement dans les eaux pollués les nutriments en bonnes proportions, les facteurs dans les bonnes valeurs (cardinales). Tous les modèles de métabolisme carboné bactérien donnent des équations et des rendements établis pour le glucose ! Tous les systèmes de perméation, de fonctionnement des exo-enzymes sont établis au laboratoire ! Et l'oxygène montre vite en station son insuffisance (point de Pasteur) ; il faut 1,42kg d'oxygène par kg de matière organique ; il peut y avoir carence en azote, parfois en carbone ! Le phosphore et le fer peuvent manquer. Il arrive ainsi très souvent que se produise la fameuse « **boucle microbienne** » qui assure le substrat. Une part du carbone entrant en station est directement assimilable par les bactéries allotrophes, le reste est à déstructurer, dépolymériser, remanier avant d'être biodégradable, assimilable, compatible. Sans compter que la matière fluide entrant dans la station ne contient normalement pas de bactériostatique ni de bactéricide, ni d'antiseptique ! Personne ne met de chlore, de médicament, de sulfites, d'arsenic et tout le reste dans ses eaux usées. Le gabarit de matière polluante a pour formule globale $C_5H_7NO_2$, sachant que tous les contours et les annexes modifient le flux standard. Les bactéries ne réclament pas comme nous au

restaurant quand il manque quelque chose sur la table ; pire, la formule simplifiée est aveugle du soufre et la microbiologie travaille à l'envers des autres disciplines. La botanique décrivait des cocotiers dans les îles avant de les porter au laboratoire ou en serre pour les étudier ; les zoologistes décrivaient des girafes dans la savane avant de les conduire au muséum et à la paillasse des savants de l'anatomie comparée. La microbiologie produit des cultures exubérantes (croissance exponentielle) en boîtes de Pétri, sur milieu gavé, pour nous expliquer comment les bactéries vivent probablement dans la nature. Et rien ne marche comme prévu. Les biochimistes, toujours un peu limités dans leurs schémas, sauront vous dire comment les bactéries consomment au quotidien du glucose à la louche mais allez leur demander si les bactéries respirent avec des acides aminés ! Toutes les bactéries ne démarrent pas l'épuration de manière synchrone au top départ de la ration du jour d'effluents. Une partie non négligeable du carbone doit être déstructurée par des germes rustiques (*Cytophaga*) fonctionnellement essentiels mais foncièrement telluriques et lents (surtout dans l'eau) qui pratiquent l'exo-métabolisme colonial, qui alimentent et régulent une bonne partie des populations allotrophes d'aval. La croissance en situation peut osciller et dériver de part et d'autre du modèle optimal de croissance floculée. Ainsi la croissance dispersée est bien insuffisante pour un bon fonctionnement de station ; ainsi la croissance filamenteuse peut dégénérer vers la prise en masse du bassin, ou vers le *bulking* (boues encombrantes, gonflement des boues, milieu saprobe) ; ces dysfonctionnements témoignent d'un vieillissement des populations et du passage en Métabolisme II avec production d'exopolymères protecteurs (effet glucose).

Comment imaginer, harcelés par notre image d'hygiène et de propreté, que notre arsenal de produits de toilette et d'entretien préserve les bactéries épuratrices et où et comment les bactéries tout juste mortes vont-elles travailler en station de dépollution ? Et la microbiologie est accusée de contre-performance ! Certains auront l'audace de vous dire que les bactéries puent. Retournez-leur le compliment en leur fourrant le nez dans le siphon du lavabo : ils sont propres sur eux mais pas dans leurs comportements ; l'odeur vient des matières que les bactéries ne savent pas minéraliser et qu'elles fermentent comme elles ont appris. Reste à traiter le soufre puisque le phosphate est supposé traité. Le carbone peut et doit être volatilisé ; l'azote ammonifié, nitrifié et volatilisé aussi ; idem de l'oxygène et de l'hydrogène mobiles. Le soufre va tourner en rond dans la station, parfois donneur d'hydrogène dans une chimiosynthèse du carbone et parfois potentiellement donneur d'oxygène dans une respiration anaérobie (voie dissimilative du carbone) jusqu'à former une stratification et stocker du soufre sédimentaire. Relativement la station s'enrichit en soufre et s'empoisonne. On aura donc compris qu'une station qui s'enrichit en soufre ne peut prétendre à la méthanisation de ses boues. Rechercher le facteur limitant en station est une base bien utile.

Pollution des eaux : définitions. La pollution des eaux correspond à des interférences indésirables entre cycles (qualitatif) et au télescopage de cycles de diamètres incompatibles (quantitatif). C'est la **dégradation** (lente ou brutale) du milieu (naturel, anthropique) et/ou des conditions de vie dans le milieu. Les circonstances correspondent généralement à une rupture d'équilibre (milieu agressé), à un incident, une inadéquation entre les acteurs et les facteurs, une inaptitude des capacités locales à absorber la matière et poursuivre le cycle. Généralement la pollution correspond à une hypertrophie locale du cycle, parfois un engorgement, parfois une rupture. La pollution peut être « matières », élémentaire ou biologique, parfois tout simplement physique (thermique, radiations). Partant du

principe que la planète Terre est un milieu vivant (macroorganisme) septique, l'eau du milieu naturel est « habitée » par quantité d'organismes et de microorganismes sans que l'on puisse parler de pollution. Le curseur « normal » de l'eau naturelle n'est donc pas sur la case « stérile » mais plutôt sur la case « oligotrophe ». L'eau est nécessaire au continuum de vie sous forme de film « mouillé » posé sur la planète, là où se concentre l'essentiel de la biosphère et du cycle. La glace est mémoire des événements planétaires et des carottes apportent des indications précises sur les variations en gaz, compositions, volcanisme, bouleversements qui se sont produits au cours des temps. Avant tout travail, un état des lieux (facteurs physiques, chimiques, biologiques, écologiques) avec inventaire complet est impératif qui va décrire une situation à un instant *t* (c'est une représentation ou une photo). D'autres photos du même endroit seront nécessaires pour traduire l'évolution de la situation et donc tracer la courbe de déplacement des équilibres (substrats, énergie, acteurs, facteurs). Beaucoup de phénomènes sont lents à se mettre en place (filaments, flocs, eaux colorées) et le suivi des équilibres entre flore autochtone et flore allochtone est obligatoire si l'on veut apporter des corrections utiles. On connaît trop l'engrenage : oligotrophe, mésotrophe, dystrophe, eutrophe… catastrophe. Les inventaires doivent renvoyer à des référentiels qui donnent la correspondance entre les paramètres et la qualité des milieux. Renvoyer aussi à des études statistiques et des échantillonnages périodiques. L'idée de déposer dans le milieu des « sentinelles » fait son chemin ; ce sont des intégrateurs de paramètres qui font l'essentiel du travail à notre place. Bref, l'idéal dans l'état de nos connaissances serait d'établir un catalogue (dictionnaire) des espèces vivantes avec la qualité du milieu correspondant et un bottin des espèces vivant dans le même « quartier biosphérique » (ensemble).

La définition moderne ajoute de nouveaux concepts :

1. La notion **d'émission** ou source ou origine de la pollution ; de circulation (effet drift ou transport) et **d'immission** pour l'introduction du facteur polluant dans l'écosystème par retombée, arrosage, pluie ou tout autre situation.

2. La notion de **déversement**, stockage, asphyxie, saturation ou déséquilibre.

3. La notion de **nature dénaturée** ou **milieu souillé** (biotope) ; le milieu peut être rendu malsain, dangereux, toxique.

4. La notion de **nuisance** avec la difficulté d'en évaluer l'impact et l'ampleur (odeurs, fumées, bruit, éclairage, interdictions).

Impacts, Prise de conscience. Il y a eu toute une série de dates « déclic » pour la prise de conscience de la pollution des eaux : citons rapidement Venise, Minamata, les marées noires, les marées vertes, les tsunamis, le choléra, la fièvre jaune, le paludisme ; plus près de nous les inondations à répétition (Yvetot 1998 ; Moselle 1999 ; Picardie 2001) assorties chaque fois d'interdictions de consommer l'eau du robinet. Le Français a du mal à comprendre. Résumons. Plus il pleut, plus l'eau est abondante et moins il est prudent de toucher à l'eau du robinet ! La peur de manquer d'eau propre (quantitatif) a glissé vers la peur du coût de l'eau potable (économique). La pollution de l'eau a réveillé les esprits parce que l'eau jouit d'un statut particulier dans notre imaginaire, notre civilisation : tous les événements importants de notre vie sont « mouillés » ; tous nos actes quotidiens importants (repas, toilette, loisirs) intègrent l'eau. Parce que tout finit dans l'eau et que l'eau sale peut contaminer des milieux sains. L'eau est un véhicule

de pollution et le réservoir final. La pollution des eaux a donc été tout naturellement un moteur de recherches pour des solutions, des innovations, des brevets (anglo-saxons) ; le résultat affiche des solutions complexes et « sur mesures » à réaliser par phases coordonnées et successives (compartimentation) traitant chacune une cible particulière avec une flore adaptée ou des flores synchronisées et alternatives. Bon an mal an, on rapporte en France un millier d'accidents (faisant objet d'un PV) entrant dans le cadre de la pollution des eaux (probablement le 1/10e de la réalité. Les principaux coupables sont les concentrations d'activités industrielles (et ZAC), les activités agro-industrielles, agricoles, les agglomérations, les transports collectifs, les consommateurs (particuliers).

Pour le microbiologiste, il y a **3 échelles** d'impact à tout événement de pollution aquatique :

1. Elle est **accidentelle**, ponctuelle et généralement **unique**. Elle est facile à détecter, brutale et il y a des solutions (abio-, bio-, mixtes). Le seul obstacle à l'efficacité est la mobilisation des moyens par les élus et les autorités dans une urgence aiguisée par les médias. L'objectif est le retour à l'équilibre (marée noire, explosion, volcan).

2. Elle est **périodique** et la période principale est la saison ou l'année ; elle est typiquement liée aux activités de l'homme comme les travaux agricoles (vignobles et cuivre, sanitaires et pesticides, épandage des boues, fertilisants, nitrates, purins), comme les activités touristiques dans les stations balnéaires. Progressivement s'installe un nouveau milieu durable et déséquilibré (phénomène du curseur).

3. Elle est **chronique** et généralement liée à une activité industrielle ou agro-industrielle ou artisanale. Il y a 3 effets marquants sur la microflore locale : un déplacement des acteurs par modification des substrats et des conditions ; une accumulation de substrats qui ne trouve pas de dégradation ; un empilement de facteurs limitants dont le plus déterminant est la diminution de l'oxygène disponible qui réduit durablement la diversité biologique.

Nature de la pollution. Le microbiologiste distingue 5 catégories de polluants en faisant une approche écologique :

1. La pollution est de **nature quantitative**, c'est-à-dire qu'il y a excès d'un élément biogène (utile) ; c'est le cas du carbone, de l'azote, du phosphore, du sodium, du magnésium, de la température, du pH ; ce peut être l'excès de charge. Le déplacement est progressif et conduit à l'hypertrophie d'un maillon trophique favorisé sur les autres ; l'anabolisme l'emporte fortement sur le catabolisme possible et c'est l'asphyxie.

2. Pollution de **nature qualitative**, présence d'un **élément rare** mais biogène ; c'est le cas typique de micro-éléments dosés comme des macroéléments, ils passent de muets à polluants sinon inhibiteurs ; c'est le cas de l'aluminium (interférences métaboliques), du soufre, du cuivre et de quelques métaux. Si la chaîne trophique locale contient un maillon sensible à la toxicité du polluant, la chaîne est rompue et l'on assiste à un empoisonnement progressif.

3. Présence d'un **élément indésirable**, abiogène, **toxique**. Beaucoup de métaux (lourds comme le plomb, mercure, vanadium, cadmium, uranium) ont un effet létal sur les bactéries (agglutination). Beaucoup de composés chlorés et plus largement halogénés (iodés, bromés, fluorés) ; les hydrocarbures et les radicaux qu'ils portent (paraffine, xylène, toluène, solvants). Un ou plusieurs maillons trophiques sont touchés et l'on va vers un milieu abiogène puis abiotique. Le polluant peut entrer dans le vivant et monter dans la chaîne alimentaire (augmentation de la concentration relative).

4. Présence d'un **xénobiotique** : ce sont des molécules fabriquées et donc artificielles ; on en comptait environ 70000 en 1982 avec la synthèse de 1000 nouvelles/an (polymères, pesticides, médicaments, peintures, vernis, résines, matières plastiques). Le pire, c'est qu'après la découverte de la récalcitrance on n'ait trouvé pour s'en débarrasser que l'incinération !

5. **Pollution biologique** (généralement germe infectieux) ; la situation est toujours compliquée car la zone hydrique est réservoir. Appliquer les méthodes de la bactériologie pour identifier le germe en cause avec test présomptif, confirmatif, démonstratif. La pollution biologique peut être indirecte (par substrats, asphyxie, etc.) ou directe (introduction massive de germes infectieux (notamment des virus) : la dangerosité est très élevée.

On distingue 4 catégories de pollution biologique directe :

1. Par **microflore introduite** ; c'est une microflore de contamination qui induit un déséquilibre et une forte modification des gradients chevauchants ; il faut alors distinguer la flore inoffensive, la flore dangereuse (géosmine), la flore parasite, la flore pathogène, la flore toxinogène, la flore contaminante (fécale) des flores sauvages, ordinaires et anthropiques. Le choix de bioindicateurs pertinents est déterminant.

2. Par **glissement de flore** : conséquence d'une modification de facteurs, de substrats de d'apports énergétiques : le scénario classique est le déplacement des diatomées vers les algues vertes puis vers les cyanobactéries ; on assiste à des pics de marées colorées à la faveur de circonstances convergentes (marées vertes, rouges, sang des Bourguignons) ; ces événements sont suivis d'épisodes toxicologiques par développement de Dinophycées dans les coquillages avec DSP (*diarrhetic shellfish poison*).

3. Par **hypertrophie de flore** ; un maillon favorisé peut prendre beaucoup de place voire toute la place si les substrats deviennent très favorables ; c'est le monométabolisme et donc pas de recyclage et pas d'auto-épuration ; le métabolisme devient entièrement organotrophe (allotrophe) ; c'est l'affaire des « *blooms* » d'été visibles et de phénomènes plus discrets comme les proliférations de Pseudomonades, des anaérobies (botulisme aviaire), des opportunistes polyvalents (*Acinetobacter*, *Flavobacterium*).

4. **Par rupture de réseau** trophique : un maillon est manquant par inhibition ou empoisonnement et l'espace vide est occupé par un opportuniste qui peut se montrer plus conquérant que les autres maillons ; la compétition tourne à l'avantage du mieux équipé qui peut retourner la chaîne vers l'organotrophie ou absorber les maillons proximaux et tout envahir.

Entrée et montée dans la chaîne alimentaire. Quand la pollution dure, il y a des espèces qui disparaissent par pollusensibilité, soit par manque de capacité d'adaptation, soit qu'elles sont en limite de tolérance : la biodiversité s'appauvrit jusqu'à une possible rupture ; la démographie diminue, la mortalité augmente.

Il y a des espèces qui réagissent, soit qu'elles résistent (pression de sélection), soit qu'elles s'adaptent en utilisant des alternatives métaboliques (du modoforme, la population évolue par les excentriques), mais la diversité physiologique diminue (toutes les cellules font la même chose) et les défenses des populations sont affaiblies. Il y a appauvrissement variétal et recentrage de populations sensibles.

Il y a les espèces qui profitent en occupant les espaces vides et en prenant la place des espèces sauvages ; ce sont des omnivores peu intéressantes pour le milieu. La substitution aux flores naturelles de flores opportunistes remonte généralement vers des saprophytes, des commensaux puis des parasites et des pathogènes qui survivent dans le milieu contaminé jusqu'à ce qu'un nouvel hôte les prenne en charge. On peut trouver aussi dans le milieu pollué des germes qui sporulent ou qui s'enkystent, entrent en vie ralentie, en asthénobiose jusqu'à des jours meilleurs. Quand la substance polluante entre dans la cellule vivante, elle peut exercer un effet inhibiteur (biostatique) ou létal (biocide). Lorsque le substrat polluant est fragmenté (biotransformation) par la cellule vivante, parfois oxydé, parfois complètement éliminé sous forme de rejets simples, on parle de biodégradation complète ou bio-recyclage (= bio-minéralisation). Cette notion est proche mais différente de la biodétérioration qui touche les œuvres d'art, les monuments et d'autres objets durables. Lorsque la bactérie modifie la substance polluante en réalisant un segment métabolique, on parle de bioconversion. Cette fonction a été mise à profit pour produire de nombreux acides aminés, des vitamines, en cosmétique, des médicaments. La bioaccumulation correspond au stockage d'un élément polluant prélevé dans le milieu de vie : la biosphère entre dans l'histoire du produit. La bioconcentration est l'augmentation relative du polluant qui passe de cellule vivante à cellule vivante (relais des maillons de la biosphère). C'est le même processus que la bioamplification naturelle de l'iode, du potassium et du sodium. La biomagnification est la montée du polluant dans toute la pyramide jusqu'aux prédateurs. La bioréhabilitation consiste à utiliser les ressources microbiennes pour décontaminer un site (mine, décharge).

Bio-indicateurs et objectifs. Un indicateur biologique est une entité de biosphère (individu, population, fonction, espèce, communauté) choisie dans le milieu naturel étudié pour mesurer, évaluer et caractériser l'état du milieu, référence faite aux grands critères d'évaluation écologique.

Le bio-indicateur doit renseigner au plus tôt (sensibilité) sur les modifications naturelles ou accidentelles des conditions perçues dans le milieu ; il peut aussi être biotopique (oxygène, transparence). L'indicateur doit montrer ses capacités à réagir ; il doit être précis, résistant et facile à « lire ». Il est souvent choisi sur intuition (pifomètre, truitomètre) et l'empirique et le subjectif prennent alors le pas que le savant. Le naturaliste commande au technicien. Il est de grand secours pour le maraîchage, la pisciculture, les baignades, les nappes, l'irrigation, les terrains de sport, l'aquaculture, les STEP. Le bio-

indicateur peut être utilisé à des fins d’hygiène et de santé publique : c’est le cas des germes signant une contamination fécale (entérocoques) fécale humaine (*Bifidobacterium*). On distingue pour simplifier :

1. Des indicateurs **d’alerte**, sorte de clignotant placé dans le milieu pour avertir des variations de pollution et du retour à la normale. On parle de sentinelles (macroorganismes).

2. Des indicateurs **d’exposition**, individus testés comme révélateurs de toxicité diffuse ou de chronicité toxicologique (souvent des poissons).

3. Des indicateurs de **diagnostic** pour évaluer rapidement la nature de la perturbation liée aux activités de l’homme et comparer à des systèmes déjà connus bien étalonnés (référentiels).

4. Des indicateurs **d’objectif** qui attestent ou pas du but atteint, dépassé ou impossible (saumon).

5. Des indicateurs de **toxicité** comme *Photobacterium*, des crustacés, des poissons.

Les meilleurs indicateurs de qualité d’eau semblent les diatomées qui sont des eucaryotes réagissant un peu à la manière des bactéries et se montrent plus « subtiles » que nous sur les variations des conditions du milieu aquatique.

Tous les contacts avec ce type d’eau (de nos activités humaines) peuvent fatalement conduire au développement de maladies dites hydriques, c’est-à-dire contractées au contact direct de l’eau souillée (maladies hydriques 1). Depuis peu, tout ce qui concerne l’ensemble des maladies d’origine hydrique entre dans le cadre du Code de la santé publique et relève du domaine d’action des Agences régionales de Santé.

Risques sanitaires

Maladies hydriques 2, maladies nosocomiales, maladies sexuellement transmissibles

On pourrait croire dépassé, voire comique, de travailler la notion de risque et de droit en matière sanitaire à une époque où l'on peut estimer le problème résolu, microbiologiquement parlant. Erreur ! C'est mal connaître les bactéries qui font un cheminement parallèle au nôtre, d'évolution et d'adaptation.

Maladies liées à l'eau (2) ou dites « hydriques »

Bien évidemment, il faudrait réécrire ici la plupart des maladies diarrhéiques à entérobactéries dont l'origine est à rechercher dans la consommation d'eau et d'aliments. Les maladies citées ici ont toujours relevé de la santé publique et peu de l'environnement ; c'est pourquoi la médecine a toujours accaparé et entraîné ce vaste domaine sur le terrain hospitalier et pas sur le terrain scientifique de la microbiologie.

Par hygiène, par égard à votre famille, vos amis, vos collègues et toute la société, aussi par appréhension d'attraper une maladie infectieuse, vous allez prendre un bain ; c'est bien ; mais après la toilette, il y aura environ 10 millions de bactéries/ml d'eau du bain ; des germes inoffensifs pour la plupart, opportunistes, commensaux, saprophytes. Si vous laissez en attente l'eau du bain pour le prochain, ce sera un bouillon de culture.

Typhoïde.

Probablement le plus grand fléau de l'humanité avec la tuberculose. La fièvre typhoïde est causée par plusieurs sérovars virulents de *Salmonella typhi* et elle est contractée par des aliments souillés par une eau contaminée ou directement par une eau souillée. L'incubation est de 10 à 14 jours après contamination au niveau du grêle ; les bactéries sont invasives (intestin, sang, foie, vésicule) ; il peut y avoir des porteurs sains et les bactéries peuvent séjourner longtemps chez l'hôte ; il y a un vaccin et les aliments le plus souvent en cause sont l'eau non potable et le lait.

Choléra.

C'est une maladie endémo-épidémique et parfois pandémique due à *Vibrio cholerae* (origine = *Vibrio comma* isolé par Koch. On l'assimile à une toxi-infection mais c'est toujours la consommation d'eau souillée par des matières fécales qui est en cause (Londres, John Snow de 1849 à 54, origine de la filtration de l'eau). L'homme est le principal réservoir. La maladie fait des vagues redoutables en Europe de 1826 à la fin du siècle (10000 morts à Hambourg en 1892 et à Paris les cercueils manquent). C'est une bactériose à incubation courte (24h à 5 jours), brusque avec diarrhée sécrétoire brutale et profuse

(jusque 20 litres de pertes avec 20 à 100 selles. Ce n'est pas véritablement une invasion comme pour les gastro-entérites classiques mais une sécrétion violente de toxines (toxine cholérique de congestion de l'intestin et toxine protéique qui provoque l'hypothermie ; desquamation de l'intestin grêle) ; les douleurs sont violentes avec angoisse ; la déshydratation est extrême avec altération de la face et crampes musculaires douloureuses, amaigrissement intense et mort en 48h par choc circulatoire et collapsus. Les bactéries sont des bâtonnets incurvés en virgule et très mobiles ; la culture est facile. Les pandémies ont une expansion très rapide (1961, 1905 *biovar* El tor, procédures d'isolement, de quarantaine) ; il reste un foyer endémique dans le Golfe de Louisiane. Les formes bénignes sont rares.

Maladies d'origine environnementale et maladies autres

La Légionellose. Voir la fiche. Il y a des airs de ressemblance avec l'asbestose ou maladie due à l'amiante. C'est typiquement une maladie liée à l'eau et qui se développe dans certaines conditions environnementales.

La Brucellose : c'est une anthropozoonose (fièvre de Malte) touchant le monde rural et transmis par la chèvre. Maladie humaine contractée auprès des animaux porteurs ou professionnelle ; phase aiguë septicémique et fièvre ondulante de plusieurs mois (*Brucella melitensis*).

Les fièvres. Principalement les fièvres récurrentes (jaune et Panama) et le Paludisme.

1. Le **Chikungunya** : « maladie qui brise les os » ou maladie de « l'homme courbé » d'origine asiatique et/ou africaine ; maladie quasi identique à la dengue transmise par un moustique du genre *Aedes* ; Arbovirus CHIKV (1952) ; entré en Europe par l'Italie ; en France depuis 2007 et en métropole depuis septembre 2010.

2. La **dengue** (1907) : maladie endémique à épidémies pandémiques (depuis Cuba) affectant surtout les enfants ; maladie à Arbovirus ; on y ajoute les « *dengue like fevers* » avec forte fièvre, céphalée et abattement ; plusieurs virus identifiés.

3. La **fièvre exanthématique** ou rickettsiose, ou groupe boutonneux pourpre transmis par les tiques.

4. **Fièvre jaune** : maladie grave à Arbovirus, endémo-épidémique ; cycle vital complexe entre le singe et le moustique (*Aedes*) et l'hôte accidentel (typhus amaril) de bénigne à mortelle ; redoutable au temps de la construction du Canal de Panama.

5. **Fièvre Q** (pour *Queensland fever*) ou rickettsiose due à *R. burneti* ; zoonose très répandue chez les rongeurs et parfois transmise à l'homme ; véhiculée par inhalation de poussières ou à la mise bas d'animaux domestiques ; acariens vecteurs.

6. **Paludisme** = Quarte ou **Malaria**, fièvre des marais ; maladies du mauvais air des régions chaudes provoquant des accès réguliers de fièvre à caractère cyclique voire chronique ; troubles hépatiques, rénaux et respiratoires ; l'agent est un protozoaire *Plasmodium* qui se multiplie dans les globules rouge avec libération de toxines ; traitement historique par la quinine et rôle bienfaiteur du

DDT ; premiers travaux en 1857 (Ross) mais c'est Grassi qui découvre le vecteur et le germe (plus de 200 millions de personnes infectées) ; vaccin.

La Tularémie. Maladie due à *Francisella tularensis* ; maladie professionnelle et accidentelle (pseudo peste de l'écureuil de 1911 à Tulare en Californie). Maladie essentiellement animale (gibiers, lapins et très nombreux animaux) avec l'homme comme hôte accidentel. Septicémie. En France, c'est le contact avec un lièvre malade qui est cause dans 99% des cas.



Conclusion partielle

L'eau est l'élément le plus vulnérable à la pollution en raison de sa présence sur toute la planète ; c'est le lien entre la vie et le milieu. Son cycle est essentiellement abiotique mais en absence de l'eau, la vie se retire. Les risques à propos de l'eau sont multiples :

1. le risque des **mélanges** : si vous mélangez de l'eau propre avec de l'eau sale, cela fera toujours de l'eau sale ;
2. Le risque des **dilutions** ; l'eau est un moyen commode de véhicule pour diluer des matières polluantes ; c'est aussi « pas vu, pas pris », le moyen de dilution des responsabilités, voire les dissimuler.
3. Le risque de source de contamination (bouillon de culture).

Maladies nosocomiales (MN), germes à surveiller et maladies émergentes ou ré-émergentes, Résistances.

Infections nosocomiales. Ce sont des maladies contractées à l'hôpital ; le patient voit son équilibre de flores modifié, ses défenses naturelles diminuées.
On compte 4 types d'infections nosocomiales : les auto-infections (par le malade lui-même, = remaniement) ; les hétéro-infections (contamination par un autre malade = contamination manuportée ; les xéno-infections venant des visiteurs ou des objets apportés (gastro-entérite fréquente en pédiatrie) ; les exo-infections dues à une insuffisance technique (ventilation, stérilisation, matériel).
Le scénario de la maladie est souvent implacable avec implantation de la bactérie, expression de la virulence (modification de la relation hôte/bactérie, prolifération), mobilisation du fer (sidérophores), variations antigéniques, éviction de la flore commensale inoffensive en place par adhésion, acquisition de résistances. Ces maladies sont souvent dues à des bactéries ubiquitaires ordinaires et opportunistes. Il en est ainsi des *Acinetobacter* (résistances associées) qui colonisent le matériel médical pourvu qu'il soit humide. Principal véhicule : les mains. 39% des infections nosocomiales se rapportent au système urinaire pour 18% le système respiratoire et 17% aux blessures liées aux opérations.

Le groupe *Klebsiella* (entérobactérie) et les KES (*Klebsiella, Enterobacter, Serratia*).

Ce sont des pathogènes opportunistes qui se développent sur un terrain affaibli : personnes âgées, diabétiques, brûlés, réanimation, nourrissons, cirrhotiques. Ce sont des entérobactéries très banales et souvent résistantes à de nombreux antibiotiques. *Idem* pour des *Salmonella typhi-murium*. A noter que le germe *Enterobacter aerogenes*, opportuniste à l'hôpital est considéré depuis 2000 comme résistant aux lactamines.

Le groupe *Pseudomonas.*

Très omnivore, très ubiquiste, très opportuniste, saprophyte. Le « pyocyanique » est le meilleur opportuniste. Beaucoup de malades graves ou de malades atteints de maladies graves (SIDA, mucoviscidose) décèdent par surinfection à *Pseudomonas*. Attention : beaucoup d'examens d'exploration (voies urinaires) peuvent être suivis d'infections dites secondaires.

Le groupe *Streptococcus* et les *cocci*.

Un rappel de la fièvre puerpérale et la difficulté à supprimer ce palier des 1%. Les streptocoques sont souvent incriminés dans les maternités. On dit aussi que *Staphylococcus* est en cause dans la plupart des cas rapportés (parfois 90% selon établissements) ; que 90% des souches nosocomiales ont développé des pénicillinases et que 50% des souches à l'hôpital résistent aux antibiotiques courants par résistance chromosomique ! Depuis 1997, on assiste à une augmentation des souches GISA (glycopeptides Intermediate *Staphylococcus aureus*).

Maladies émergentes. La maladie de Lyme due à *Borrelia burgdorferi* (borréliose ou fièvre récurrente). C'est un ensemble de maladies proches transmises par des arthropodes hématophages (poux, tiques).

La grippe aviaire avec des virus variant capables d'hôtes multiples et notamment les êtres humains (Hong-Kong)

Maladies dues à des germes bien connus mais ayant acquis des résistances à la plupart de nos antibiotiques (*Staphylococcus, Klebsielle, Pseudomonas*).

Maladies ré-émergentes : la **tuberculose** sur des personnes infectées par HIV et germes ayant acquis des multi-résistances. Surveiller aussi la **rougeole**.

Résistances. Les antibiotiques sont d'origine microbienne et ont une action antimicrobienne, principalement antibactérienne. Le risque est réel face à l'acquisition des résistances cumulées chez les bactéries.

1. Risque **direct** : contamination par un germe résistant dans la vie courante ou en séjour hospitalier ; ou postérieur à un traitement antibiotique, sélection de la flore de portage et sélection des résistants.

2. Risque **indirect** par contamination des viandes et/ou des animaux d'élevage (boucherie, volailles) ; attention à *E coli* O 104, O 157 et d'autres ; autres germes potentiels : *Bacillus*, *Micrococcus*.

3. **1/3 des antibiotiques** produits dans le monde sont utilisés dans l'alimentation du bétail avec augmentation de l'appétence et du poids musculaire, 2 à 5% de vancomycine) ; la méthode est courante pour éviter la vaccination (prévention !) ; courante pour tolérer la promiscuité sans risque ; attention : dans beaucoup d'activités, les bactéries éliminées sont résistantes ; pour combien de temps qans drame ?

4. Les **résistances sont acquises** par 2 mécanismes : la résistance chromosomique (rare, modification du génome, grave, avantage sélectif) ; par résistance plasmidique par contamination, transformation, conjugaison, transposition, transduction ; ces résistances sont cumulables.

5. **Parades** bactériennes pour esquiver les antibiotiques : le brouillage (enzyme de neutralisation), blindage (efflux, refouler la substance), camouflage (acétylation des sites sensibles), esquive (fausses cibles mises en place, plus sensibles et inopérantes).

Conclusion partielle

N'apportez pas d'objets inutiles à l'hôpital ou à la maternité ; il y a danger et risque.
Germes à suivre : *Clostridium* (*difficile*), *Yersinia* (*enterocolitica*), *Escherichia*, à suivre les souches qui passent à travers les traitements antibiotiques dans les élevages.

Maladies sexuellement transmissibles.

La gonococcie. Elle est due à *Neisseria gonorrhoeae* observé par Neisser en 1879. Distinguée de la syphilis à partir de 1830, on l'appelle aussi la « chaude pisse » en raison des brûlures et du pus abondant. La maladie est en forte diffusion jusqu'à poser problème de santé publique ; nombreuses formes résistantes et formes asymptomatiques (femmes).

Le chancre mou. Maladie due à *Haemophilus ducreyi* strictement adapté à l'homme. Maladie endémique des régions tropicales et subtropicales, la maladie avait disparu d'Europe pendant plusieurs décennies avant de réapparaître en 1970. Pustule, ulcération, bubon et fistulisation après ramollissement.

La syphilis (*Treponema pallidum*) est une maladie vénérienne strictement humaine à contact direct (= vérole différente de petite vérole ou variole). Soit qu'elle soit très ancienne (antiquité mais confondue avec la gonococcie ?), soit plus vraisemblablement rapportée en Europe par les navigateurs puis disséminée par les guerres. De très nombreuses formes existent et la maladie était en forte diminution avant de montrer une nouvelle offensive.

La maladie de Nicolas-Favre ou lymphogranulomatose vénérienne à *Chlamydia* (LGV), avec absence fréquente de troubles francs ou de symptômes ; risques de stérilité chez l'homme et la femme ; germe parasite obligatoire avec phase d'éclipse.

Les **candidoses** à *Candida albicans* (levures) souvent liée au port de vêtements serrés.

Les **Herpès**, maladies virales récidivantes.

Le **SIDA** (AIDS), maladie à rétrovirus, ARN simple brin, syndrome d'immuno-déficience acquise ; indiquée à Atlanta dès 1981 ; germe isolé par l'équipe de Luc Montagnier ; séquencé depuis 1985 ; transmission par le sang et les dérivés, par le sperme ; groupes à risques ; effondrement du système de défense de l'organisme ; séropositivité = portage sans maladie déclarée.

Chaque fois c'est l'homme qui ouvre la porte du risque en grand en donnant une grande opportunité à un germe… qui en profite pour coloniser et proliférer.

Le Méthane : Risque environnemental ou Energie propre ?

Le méthane est le symbole de la chimie organique ; Kekulé, 1861, le carbone tétravalent. C'est une molécule pionnière de la biogenèse (soupe primitive) dans la phase réductrice de la planète ; c'est devenu un poison ou un danger pour la vie. Il a été détecté dans l'atmosphère à hauteur de 1,7ppM contre 340 au dioxyde de carbone. Le premier producteur de méthane naturel est le sol froid et l'océan froid (150 millions de tonnes), puis les rizières et l'agriculture en zones inondées (100 millions de tonnes) ; les animaux d'élevage n'arrivent qu'en 3e position avec 50 millions de tonnes. Une vache peut produire environ 100 à 200 L de méthane/jour.

1re observation : il y a **2 modèles de méthanisation**, le modèle **froid** extensif et le modèle **chaud**, intensif.

L'homme produit du méthane (explosion de patients opérés par thermo-cautérisation d'hémorroïdes !) surtout par ses activités (mines, décharges, compost, raffineries). Le méthane contribue à l'effet de serre, 20 fois plus que le dioxyde de carbone à masse égale. Le méthane est présent dans l'univers (Titan). Le biogaz à méthane serait une excellente solution pour valoriser les déchets (agricoles) à condition de travailler par petites unités (ferme). En Chine, il y a des millions de digesteurs, un peu moins en Inde et si l'on méthanisait les boues des eaux de Paris, on produirait 140000 m3 de biogaz à méthane/jour. Le méthane correspond à un bouclage de cycle (carbone) par une voie originale et exclusive (archéobactérienne exclusivement). L'énergie méthane ne fait d'ombre à aucune autre.

La **méthanogenèse** est considérée globalement comme une fermentation anaérobie stricte (l'oxygène est biocide) en phase liquide. L'équation globale de Buswell indique pour 1 molécule de méthane, 3 molécules de méthane pour 3 de dioxyde de carbone avec une énergie libérée très faible (moins de 50 kcal). En revanche la combustion des 3 molécules de méthane libère 630 kcal soit 90% de l'énergie du substrat. A remarquer donc que la méthanogenèse perd 50% de la matière en gardant 90% de l'énergie ! Un concentré pour pas cher. A remarquer aussi en bon chimiste que c'est une conversion froide (autour de 35°C) sans prélèvement de carbone ni pratiquement d'énergie, donc la croissance des levains est particulièrement faible. Le parcours matière se déroule en 4 phases disposées en « trémies »[22].

---

[22] En 1, l'hydrolyse des polymères, notamment la cellulose, l'amidon, les protéines, la chitine, la lignine, la pectine ; les germes en cause sont des saprophytes organotrophes ubiquistes et omnivores qui pratiquent l'exométabolisme principalement aérobie ; il y a formation de petits édifices, dimères, monomères et de biomasse microbienne (sucres, acides gras, acides aminés, nucléotides). La flore est tellurique, aérobie, mésophile et mobilise l'oxygène et de l'eau (beaucoup de champignons, des myxobactéries, des microcoques, *Bacillus*, *Bacteroïdes*, *Clostridium*, *Cellulomonas*, *Pseudomonas*, *Cytophaga*, *Vibrio*, *Serratia* et autres germes à tout faire. La matière entrante est essentiellement carbonée et il arrive que l'azote et le phosphore manquent à l'hydrolyse. En 2, la conversion des monomères dans un milieu où l'oxygène commence à manquer ; c'est la fermentation « acides mixtes » post-glycolytique et ramifiée qui domine et fait passer le moût en deçà du point de Pasteur. Il se forme de l'acétate, du lactate, du succinate, du formiate, un peu d'éthanol, d'acétaldéhyde, de l'acétoïne, du butanediol en phase acidogène. La voie est anaérobie et l'équation en a été donnée par Harden pour *Escherichia*. Il peut y avoir un peu de butyrate et de propionate. La flore spécialisée est dite AGV (acides gras volatils) mais attention : cette phase est caractéristique des entérobactéries ; disons qu'elle les favorise (*Proteus, Escherichia, Salmonella, Shigella,*

Les travaux de Van Niel et Barker ont démontré qu'il ne s'agit pas d'un métabolisme cyclique mais linéaire et en impasse. C'est un métabolisme qui ne se produit que parce qu'il n'y a pas d'autre solution. Les voies de méthanisation sont diverses mais 2 dominent :

1. **La réaction acéto-clastique** est la plus simple et interviendrait pour 66-70% du total mondial (*Methanobacterium* + *Methanosarcina*) ; une partie de la réaction est dépendante de l'apport en dioxyde de carbone ! Et en partie associée à la formation de H_2S !

2. La deuxième voie principale est une **respiration anaérobie stricte** couplée à une chimiosynthèse lithotrophe ; le dioxyde de carbone est réduit par de l'hydrogène et c'est le bicarbonate en solution qui approvisionne en dioxyde de carbone ; on dit qu'il y a respiration carbonate et formation d'un peu de formiate. Le pouvoir réducteur ne vient pas seulement du métabolisme énergétique, il y a aussi la dénitrification et/ou la réduction du soufre : il y a donc libération de diazote volatilisé et libération d'hydrogène sulfuré très dangereux. Cette voie peut représenter jusque 30% du méthane final. Les méthanogènes terminaux vivent en chaîne syntrophique avec les microorganismes d'amont qui les approvisionnent en métabolites. Chacun aura remarqué que le carbone méthanisé est finalement un « déchet » métabolique ! Que le CO_2 d'amont donne du carbone dissimilatif (exogène) et du carbone assimilatif ; le dioxyde est donc à la fois nutriment carboné et accepteur final de pouvoir réducteur ! Quand le menu d'aujourd'hui ressemble à un accommodement des déchets d'hier avec les restes de l'assiette, on parle de chimiosynthèse lithotrophe organo-dépendante couplée à la respiration anaérobie. Comme il y a peu de germes méthanotrophes et que le méthane est léger, le milieu s'appauvrit en carbone, *idem* de l'azote et du soufre !

3. La 3e voie n'est pas négligeable, c'est la fermentation du **méthanol** de *Methanosarcina* ; le méthanol est donneur de pouvoir réducteur et accepteur final (il faut 4CH3OH pour $3CH_4$ et $1CO_2$) ; cette fermentation est généralement associée à celle de la méthylamine (CH3-NH2) avec libération de méthane et d'ammoniac. Des voies annexes font intervenir des transporteurs spécifiques d'électrons et des intermédiaires de métabolisme associé (glycéraldéhyde, formaldéhyde, méthanol, acide pyruvique).

Les **chimistes** font remarquer que la conversion du dioxyde de carbone + $4H_2$ en méthane (1) s'accompagne d'une forte réduction du volume gazeux ; et ce qui peut se passer dans le milieu naturel sans problème ne peut se produire au laboratoire ou en fermenteur sans un appel d'air important avec entrée de dioxygène très inhibiteur. Ce qui explique la lenteur des progrès en méthanogenèse. Les **biochimistes** démontrent que la réaction finale nécessite une CO_2 déshydrogénase très originale qui fonctionne en 4 étapes au moins et peut donc s'arrêter à tout moment par blocage ou inhibition

---

Aerobacter, des Corynébactéries et des lactobacilles, des *Clostridium*, des *Microbacterium*, *Tetracoccus*, *Vibrio*, *Bacillus*. L'hydrolyse est le premier facteur limitant. En 3, la phase acétogène qui correspond à une mise au gabarit en C2 ; c'est l'interface entre entérobactéries et archéobactéries ; elle est anaérobie stricte avec production quasi exclusive d'acétate, de formiate, de dioxyde de carbone (minéralisation) et de dihydrogène ; c'est le dernier carrefour métabolique avant l'impasse méthanogène, le pH baisse, c'est l'acidité. La flore en cause, c'est *Clostridium*, *Desulfovibrio*, *Methanobacillus* et bactéries acétogènes et homoacétogènes. A-t-on remarqué que la méthanogenèse s'engage alors comme une minéralisation partielle et inaboutie de la matière carbonée ? Jusqu'au méthane et par compensation (oxydo-réduction) les autres éléments sont accepteurs d'hydrogène : l'oxygène pour donner de l'eau, l'azote pour donner de l'ammoniac, du soufre pour de l'hydrogène sulfuré, éventuellement le phosphore. En 4, la phase méthanogène et la fermentation méthanique : c'est un équilibre dans la minéralisation (CO_2 + CH_4) en milieu très réducteur en sachant qu'il y a compétition entre carbone et autres éléments pour l'hydrogène (soufre notamment).

(dioxyde de carbone, formiate, formaldéhyde, méthanol, méthane). Les **biologistes** cellulaires font remarquer que la synthèse de méthane est couplée à la production d'un potentiel de membrane générateur d'ATP ; tout indique donc que dans la méthanogenèse, il y a un mécanisme respiratoire avec accepteur final exogène. Et le gradient de protons peut être échangé avec un gradient de sodium.

Les **germes méthanogènes** sont archéobactériens qui vivent en associations et chaînes trophiques ; il n'y a pas d'unité systématique mais au moins 3 Ordres et au moins 13 genres. Ce sont des EOS (extrêmement oxygéno-sensibles) à croissance lente nécessitant un apport en acétate, lactate, bicarbonate et dioxyde de carbone. Ils sont à la fois sensibles aux dérivés halogénés (chlore) et à la chaux (boues). On peut considérer que la méthanogenèse est une fonction pionnière, relique, fragile, sensible à la lumière, en sursis sur notre planète ; à nous de la cultiver.

La pratique de la méthanisation correspond à la quadrature du cercle. Le mieux est de réaliser un levain avec flores associées sur des lits (expansés, fluidisés, mobiles, turbulents) à supports granulaires. Il y a plusieurs modèles et de nombreux paramètres. La température idéale est de 35°C jusque 40°C, c'est la zone mésophile ; à presque 65°C les enzymes sont inhibées. Le pH optimal est de 7,2 – 7,4 pour amorcer mais il faut revenir à 5,5 – 6 pour les acétogènes et entre 6 et 8 pour les méthanogènes. Il faut surveiller le pH car le métabolisme libère de l'ammoniac qui fait remonter le pH et bloque la production. La chaux des boues peut fixer l'excès de dioxyde de carbone en donnant du bicarbonate de réserve mais si la chaux a été appliquée en excès elle rend le bicarbonate insoluble, entartre le fermenteur et arrête la production. Il faut aussi surveiller la production d'hydrogène qui peut monter à 6 ou 7 ppM dans le digesteur. La charge organique est exprimée en Kg de DCO et l'on peut fonctionner entre 0,5 et 50 Kg/m3/jour. Le temps de sé&jour se compte en semaines sauf en pilotes où il se compte en jours. La production par digesteurs en séries est la mieux adaptée. Le tri des entrants est impératif (homogénéité, régularité) ; les oligoéléments sont nécessaires aux enzymes mais gare au fer qui précipite le sulfure ! Gare au sel alors que K, Ca et Mg sont indispensables ! La fluidité des entrants est nécessaire mais il ne faut pas diluer avec de l'eau de pluie ; La matière à fermenter est réglée à 5 – 15% de MS. L'hydrolyse est assistée et la courbe des levains est surveillée. Attention, le temps de doublement des bactéries peut varier de 2h à 200h selon les conditions du milieu.

Méthane et hydrogène. La méthanogenèse est toujours accompagnée de voies hydrogénogènes qui maintiennent un volant de réduction en amont de la réaction finale ; cette production d'hydrogène libre coïncide avec la libération d'hydrogène sulfuré très nocif et dangereux. Les deux témoignent d'un milieu qui évolue vers une absence d'accepteur carboné final et progressivement vers un moût abiogène puis abiotique. L'idéal est donc de pomper en continu l'hydrogène formé et de fixer l'hydrogène sulfuré. Mission difficile. On a vu de plus que le pH trop acide pouvait bloquer la production de méthane. Dans le modèle chaud des ruminants, des flores associées et le ruminant lui-même (il y a des bactéries, des champignons, des protozoaires et le ruminant fournit de l'urée) assurent des prélèvements d'acides intermédiaires (acétate, propionate, butyrate, lactate) en maintenant un milieu idéal à la méthanisation. Ce modèle de fermenteur reste à imiter, à égaler. On cherche aussi à produire des levains en colonies mixtes en associant acétogènes et méthanogènes en présence de silicates et de sulfure de fer ; ces grains de levains subissent l'entrappement avant l'optimisation. C'est le dogme de la culture pure qui tombe en bactériologie ! *A contrario*, des chercheurs tentent de bloquer les réactions antérieures en vue

un shunt exclusivement producteur de dihydrogène, élément considéré comme l'arme absolue de l'énergie du futur, zéro déchet à la clé.

Je n'ai pas développé mais chacun se doutera que l'étude physiologique approfondie de la méthanisation a ouvert de nombreuses voies d'application. Je cite ici simplement la solvantogenèse qui vise à bloquer (déréguler) des voies classiques de l'oxydo-réduction dans le métabolisme intermédiaire de populations spécialisées pour orienter la production de substances utiles comme les divers solvants (acétone, alcools) et bien d'autres produits.

Il n'y a pas de germes méthanotrophes vrais ; seulement des méthylotrophes qui peuvent métaboliser une partir de méthanol. Le méthane produit est donc à notre seul usage !

Le risque dioxyde de carbone.

Libre et circulant, il n'est pas directement catastrophique pour la planète ; c'est même un excellent nutriment pour la grande majorité des organismes vivants sur notre planète : les bactéries et les végétaux. C'est l'accumulation et l'accompagnement qui posent problème. Par exemple, pour l'excès dont tout le monde convient qu'il est préoccupant (on compte les efforts écologiques et économiques en faveur de l'environnement en économie de kg de CO_2 émis !), il y a des solutions microbiennes. Le dioxyde de carbone est le nutriment carboné de la photosynthèse universelle. Toute la biosphère dépend de près ou de loin du bon fonctionnement d'une grosse et unique enzyme bifonctionnelle, la Rubis-CO qui contribue à convertir de l'énergie solaire en énergie matière carbonée (sucres). Le dioxyde de carbone est aussi le nutriment banal de la presque totalité des bactéries qui le fixent selon le mode organotrophe par carboxylation sur le métabolisme intermédiaire pour synthétiser rapidement des composés en C4 indispensables à la croissance et à l'anabolisme (matière cellulaire).

Le dioxyde de carbone (ne dites pas gaz carbonique) intervient aussi et hélas comme un acteur complice dans une pièce complexe ; il faut donc presque toujours l'associer à l'azote et aux phosphates dans les pluies acides, au méthane et à la vapeur d'eau dans l'effet de serre, au soufre et à l'eau dans le smog et le fog, à l'ozone et au chlore dans les pollutions d'été. Les pluies acides sont une menace pour les forêts et ne s'arrêtent pas aux frontières ! Elles contribuent à une forte érosion et dégradent les constructions. **L'ozone** est à la fois instable, nécessaire et vital (pour notre protection face aux UV) mais au niveau du sol, l'ozone entre dans les oxydes d'été polluants en milieu peu brassé. **L'effet de serre** est difficile à mesurer à notre époque : tout indique que deux effets se brouillent, l'effet explicité par les paléontologues qui prédisent une prochaine phase de refroidissement ; l'effet prévu par les écologistes pessimistes qui annoncent un réchauffement climatique. Les deux produisent un faux équilibre. L'analyse climatique mondiale montre en revanche à coup sûr une augmentation du poste des entrées énergétiques (effet de serre, réchauffement, montée des océans), une activation du cycle de l'eau créant plus de nuages et plus d'effet de serre. L'engrenage est donc nettement quantitatif (augmentation du diamètre du cycle). De plus, il y a fort à parier que plus de 90% du dioxyde de carbone biosphérique soit d'origine microbienne. Et le CO_2 n'interviendrait que très partiellement dans l'effet de serre face à la vapeur d'eau, au méthane et aux composés légers et centrifugés par la planète au dessus des pôles. C'est l'océan qui est le principal réservoir de CO2 (0,5mg/L à 0°C) et l'atmosphère n'en

contient que 0,034% soit 340ppM. Il est 50 à 60 plus abondant dans l'eau que dans l'air et parfois jusqu'à 150 fois plus selon la température.

Le risque dioxines et les conséquences de Seveso.

On décrit plusieurs affaires emboîtées à l'origine. De 1941 à 1950, un laboratoire suisse produit de l'hexachlorophène à usage bactéricide incorporé aux savons de toilette destinés aux Etats-Unis ; l'usage est appliqué aux enfants et nourrissons ; on relève pendant ces années plusieurs cas de troubles du système nerveux, signes assimilés à un empoisonnement par organochloré. On note des accidents dans les maternités US à partir de 1950 ; en 1957 des élevages américains de volailles sont décimés à cause de l'alimentation contaminée par une dioxine, puis on note une série d'accidents industriels sur des ouvriers intoxiqués (lésions dermatologiques) ; au Vietnam entre 1961 et 1971 les forêts ont été arrosées de défoliants et de débroussaillants puissants (agent orange, a. trichloro-phénoxy-acétique) ; puis vient l'affaire du talc Morhange en France (1972, drame) ; traces de TCDD (2,3,7,8, tétrachlorodibenzodioxine).

En 1976, intervient l'accident de Seveso qui va opérer comme un véritable « tournant environnemental ». Les faits à Seveso remontent au 10 juillet 1976 à Méda, à 20km au nord de Milan dans l'usine IC MESA (Suisse). Des témoignages font état d'un incendie et d'une explosion (pas sûr) dans un réacteur chimique (l'usine produit des pesticides, des désinfectants et des bactéricides) le samedi midi. Il y a un nuage de fumée qui s'échappe des cheminées de l'usine et se dirige sur la ville de Seveso (Lombardie) ; les habitants n'y prêtent pas trop attention. 2 jours après, des animaux domestiques meurent (chats, lapins, poules, chiens). Beaucoup de plantes sèchent et meurent, la plupart sont potagères ! 9 jours après l'accident 739 habitants sont évacués ; la direction de l'usine (Givaudan, Hoffmann-La Roche) informe sur la présence de TCDD (tétrachloro-benzoparadioxine ou « dioxine de Seveso ») ; les autorités de la Région apprennent que plus d'1kg de TCDD s'est échappée et s'est répandue lors du processus de fabrication du trichlorophénol intervenant dans la fabrication d'un désinfectant bactéricide : l'hexachlorophène ; il y a aussi du PCDD (poly-chlorodibenzo-para-dioxine). C'est une erreur dans le process de fabrication qui a entraîné une élévation anormale et forte de la température. On compte 102ha complètement inhabitables. C'est une catastrophe écologique sans précédent et sans mort directe. Le choc est d'autant plus grand que progressivement on réalise que 37000 personnes sont touchées ; elles présentent des nausées, des troubles, des étourdissements, des diarrhées et des traces de brûlures. Quelques une ont des pustules sur la peau, c'est le chloracné.

En 1983, des fûts de Seveso traversent la France et y séjournent une dizaine d'années.

Au moment de la crise de Seveso sort la loi française de 1976, puis le 24 juin 1982 la **Directive** dite Seveso (82/501/CEE) concernant les risques d'accidents majeurs de certaines activités industrielles (Mobilisation des acteurs pour la prévention). L'Ecole Polytechnique publie en 1985 une alerte sur la présence de dioxine dans le lait de vache ; en 1994, l'Académie des Sciences retient pour la dioxine et ses analogues le terme « dioxines » au pluriel (probablement une petite centaine de molécules différentes à même motif principal). En 1996, Greenpeace publie un rapport sur la contamination du lait

de vache par les dioxines. On découvre que les dioxines se forment vers 300°C sur des cendres chaudes à partir de la combustion incomplète de déchets et à partir de précurseur (chlorophénol).

En 1998 éclate **l'affaire d'Halluin** (Nord), et établit le lien entre l'incinérateur de la Communauté Urbaine de Lille et la dioxine dans le lait de vache (2 producteurs, 600 litres/jour/x2) ; la presse du 28 janvier 98 indique qu'il n'y a pas de risque pour la santé ; en réalité il y a 3 incinérateurs pointés du doigt : Halluin, Wasquehal et Sequedin ; on note la prudence et la discrétion des autorités : l'interdiction de commercialiser est envoyée par courrier ordinaire. L'incinérateur d'Halluin a alors 30 ans, il incinère 86000T de déchets/an ; les usines sont fermées par précaution extrême (les autorités : « Il faut lutter contre les fantasmes et la psychose ») et les déchets envoyés à Barlin (Béthune). La substance incriminée (dioxine) est classée comme constituant chimique cancérigène[23] par l'OMS (produit des radicaux libres dans la cellule). Elle est connue pour monter dans la chaîne alimentaire à partir de l'herbe.

Les réactions françaises sont incohérentes et traduisent une inorganisation manifeste. C'est à cette époque que naît l'idée, puis la création de la cellule de crise. Pour l'affaire du nord, les échantillons sont expédiés à Lyon (Ministère de l'agriculture), les analyses sont longues et tout montre que la vache n'accumule pas la dioxine, elle la concentre dans le lait (donc elle l'évacue !) ; *idem* pour les œufs des volailles et le gras des poissons (fin 2003, le saumon européen est dioxiné et les français sont les plus gros consommateurs de saumon !). Pire, il est des autorités scientifiques pour claironner « pas de panique », en diluant la dioxine, l'effet nocif disparaît ! Le taux d'alerte est de 3 picogrammes/g de matière grasse (=1 nanogramme/m^3). Les relevés d'Halluin donnent à 1000m de l'incinérateur 15 picogrammes/g de mat gr.

« *Il n'y a aucun risque réel pour la santé de l'homme* »
(Direction départementale de l'action sanitaire et sociale)

« *On n'est pas du tout inquiet pour la population* »
(Centre antipoison de Lille)

Petit à petit, on découvre qu'il n'y a pas que le lait de vache (émergence de chaîne alimentaire), les jardins potagers sont touchés (chroniques) et on retrouve des dioxines dans les granulés donnés aux truites et aux saumons d'élevage en France. *Idem* dans le lait des mères danoises allaitantes (= c'est un phénomène que l'on appelle « déstockage des toxines »).

[23] Grâce aux bactéries, on teste et on classe des substances chimiques comme cancérigène, mutagène ou tératogène. C'est le test de Ames (1970). La bactérie test est *Salmonella typhimurium* dans des souches mutées pour des caractères clairs à interpréter (acides aminés, paroi) dont les systèmes de réparation de l'ADN sont déficients. On teste le produit sur la culture et on note le nombre de colonies revertantes. Un extrait de foie est ajouté au milieu pour rapprocher les conditions de fonctionnement dans le corps humain.

Le devenir des dioxines dans le sol est problématique. Les molécules de dioxines correspondent à des xénobiotiques ; l'éventuelle dégradation semble se produire selon le schéma établi pour des pesticides organo-chlorés ; elle est mixte : abiotique par photo-oxydation et biologique par cométabolisme. Le cométabolisme n'est jamais un métabolisme principal, il faut donc un substrat carboné principal (acétate ou méthanol) et le travail en caissons est justifié ; si on n'apporte rien, on parle de métabolisme gratuit mais les bactéries sont peu pressées. Les germes en cause dans ce type d'intervention sont : *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Corynebacterium*, *Aspergillus* avec besoin des Actinomycètes et *d'Arthrobacter*. Cette opération est assimilée à une détoxification mais beaucoup des substances traitées sont considérées comme des CTO (composés traces organiques) dont la plupart sont de puissants antimicrobiens ! Secondairement, des produits intermédiaires de dégradation sont très toxiques (chlorure de vinyle, chlorophénols) et cancérigènes. L'opération nécessite au moins 3 mois et se pratique en 2 temps : traitement anaérobie strict avec déshalogénation clostridienne, opération très efficace contre les chlorures mais des méthanogènes interfèrent et le carbone peut être limitant (ajouter acétate). Traitement aérobie avec deux temps : méthylation du cycle sur 2 sommets proches ; ouverture et rupture du cycle en C4 + C2 puis métabolisme intermédiaire ou minéralisation ; on y trouve *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Corynebacterium*, *Xanthomonas* principalement.

Autres Xénobiotiques et notion de biodégradabilité.

En 1948, le suisse **Paul Hermann Müller reçoit le Prix Nobel** de médecine pour ses travaux d'ensemble sur la biochimie des insecticides et notamment du **DDT** (dichloro-diphényl-trichloroéthane) ; ces organochlorés vont sauver la vie de millions de gens dont beaucoup d'enfants et sauver les récoltes de populations pauvres ; ils vont également dégrader partiellement la photosynthèse des plantes aspergées (Vietnam, Agent orange = 2,4-D + 2,4,5-T ; agent bleu = 2,4-D + pichloram ; agent blanc = cacodylate de Na + diméthyl-arseniate) et entrer progressivement dans la chaîne alimentaire. A partir de 1954, c'est la catastrophe : on découvre que le DDT se conduit en xénobiotique, récalcitrant et rémanent. Pour 1ppM mesuré sur la plante, la concentration peut être multipliée par 150000 dans la chair du poisson carnassier. Aux Etats-Unis en 57, la concentration passe de 5ppM dans les herbages à 2500 dans la chair des poissons et pire, le lait des femmes contient du DDT. *Idem* des suédoises qui ont du DDT au bout des seins ! Idem des phoques de l'Antarctique ! C'est le principe de l'infaillibilité microbienne qui s'écroule et la découverte horrifiée de la montée des xénobiotiques dans la chaîne alimentaire jusqu'à l'assiette des hommes. L'espoir c'est *Pseudomonas putida* quand il aura adopté son plasmide complexe. Ce sont les pesticides qui ont tué les abeilles, les flores du sol et les herbages et ce sont les eaux qui récupèrent les molécules.

Jusque-là, nous étions sur l'idée que le sol assainit, que l'océan recycle tout et digère tout, que la vie s'accommode des produits chimiques et rien ne résiste aux microorganismes ; c'est faux. Il y a des molécules fabriquées (synthèses, polymères, co-polymères, résines, matières plastiques) **par l'homme et inconnues des microorganismes** (pas d'équipement enzymatiques)**. Pour être biodégradable, un produit doit être « bio-assimilable » c'est-à-dire démontable** (déstructuré, absorbé ou dissimilé) **et biocompatible avec le métabolisme intermédiaire** (transport, enzymes, perméation)**.**

Il faut faire des recherches dans ce sens pour des dégradations compartimentées dans le temps ou dans l'espace ou les deux ; avec des co-cultures (Canada, USA, *etc*). Il y a un tronc commun de voies métaboliques avec la dégradation des dioxines (indiquée plus haut).

Les catégories de pollutions. Les perturbations en série du milieu par des événements de pollution ont eu au moins ce mérite de proposer des catégories bien distinctes de manière à pouvoir traiter efficacement. Pour simplifier, on distingue 5 catégories de « Pollution-Matière ».



1. **Excès d'un élément utile** comme l'azote, le phosphore (eutrophisation, blooms) ou la variante d'apport en masse d'une molécule utile (cellulose, amidon) ; il y a des solutions et des facteurs limitants (l'oxygène est toujours limitant).

2. **Apport chronique d'un élément rare**. C'est un oligoélément apporté à la dose de micro, voire de macroélément ; cas du cuivre, du sodium, du fer, de l'aluminium, du sélénium éventuellement. Il y a empoisonnement et déplacement de flore.

3. **Apport d'éléments non biogènes** comme le mercure, le plomb, le chrome ; ce sont des inhibiteurs ou des compétiteurs d'enzymes, des antagonistes, des poisons (arsenic).

4. **Apport de xénobiotiques** comme les colles, les plastiques, les vernis, phénols, pesticides, médicaments.

5. **Pollution par apport de pathogènes**, de toxinogènes (germes dangereux et virus.

Les revers du tout bio (livres et bibliothèques, bois et charpentes, traiter *or not* traiter ?) se sont déjà manifestés dans tous les domaines de nos activités. Un ou deux exemples pour survoler le thème.

L'affaire du **DDT** a montré du doigt les chimistes triomphants et remis en marche les biologistes mécanos. Le *Bacillus thuringiensis* produit une spore sous forme d'un cristal insecticide pour des chenilles (phalènes). Très rapidement le *Bacillus* remplace le pyrèthre fourni par les botanistes. Sauf que l'efficacité de la méthode montre ses limites avant 10 ans d'application pour raison d'apparition de formes résistantes et l'engrenage est enclenché. *Idem* avec *Bacillus popilliae*. La surenchère vient du transfert génétique aux plantes du patrimoine insecticide de la bactérie à grand renfort de technologie ajoutée, de coût et les agriculteurs tenus à l'écart sont mains liées. Vive le maïs Bt. Les Amiénois connaissent la Tour Perret et la supportent sans l'aimer. La construire supposait du fer et du béton (armé), c'est-à-dire des éléments bien utiles à des bactéries lithotrophes (fer ferreux, ammoniac, oligoéléments) ; ajoutez-y des pluies acides (il pleut au moins 365 jours par an en Picardie) et un entretien très bas de gamme (moitié produits biodégradables, enduits ordinaires et moitié eau de pluie ; absence de traitement des bétons aux résines vitrifiantes) et vous obtenez sur les faces exposées une grande malade de la biodégradation du béton qui touche les bâtiments, les quais, des ports et que l'on doit à des *Bacillus* et des *Thiobacillus* qui trouvent de grandes surfaces de colonisation, le dioxyde de carbone, l'ammoniac, le fer et l'humidité jusqu'à produire de l'acide sulfurique. Par manque total d'à-propos l'assemblée des copropriétaires a décidé de réhabiliter la Tour et de la protéger, la municipalité

(Robien) de la coiffer d'un phare multicolore. Ne plus chlorer les papiers, c'est bien ; moins de sulfites pour les bois et papiers ; moins de mercure, moins de vernis, moins de plomb et de chrome, c'est bien, mais les microorganismes n'ont plus de respect pour nos écrits, nos bois de construction, nos instruments de musique, nos tissus précieux et vêtements, nos tableaux. Les civilisations avaient pris l'habitude de poser hors du cycle de la matière et du recyclage des objets durables que nous disons d'art et que nous exposons sans nous demander pourquoi ils ont échappés à l'appétit des bactéries. Remake de la peinture flamande face à la peinture à l'eau (italienne). On utilise les microorganismes pour de la chimie douce à froid en comptant sur des polymères bio (cellulose, adhésifs, colles, supports de peinture, caoutchoucs), des médicaments et des aliments ou compléments alimentaires et alicaments sans se soucier que les produits biofabriqués sont immédiatement accessibles à d'autres microorganismes de la biodétérioration (papiers, colles, peintures, revêtements). Enfin, les américains rapportent quelques accidents d'avion imputables à la formation de boues et tartres dans les réservoirs lavés à grande eau !

Le risque des boues et d'épandage des boues

La France produit environ 850 millions de tonnes de boues en matière sèche (MS)/an soit 14kg/an/citoyen. Les boues figurent au chapitre des risques et dangers alors qu'elles devraient figurer au titre des fertilisants ou des matières à valoriser. Avant la Directive européenne, le statut de la boue entrait dans le cadre de la Loi de 1979 comme matière fertilisante et de la loi de 1976 sur les ICPE ; elle est mentionnée aussi dans la loi sur l'eau de 1992. Dans l'incertitude et l'ambiguïté intervient le Décret de décembre 1997, puis l'Arrêté de janvier 1998, sur les travaux de l'INRA, la boue prend le statut de « déchet », donc d'objet suspect, donc la nature et la qualité sont à surveiller (le coût des analyses va devenir un frein, puis un problème) et le producteur de boues devient responsable. Avant tout épandage, le producteur de boue doit présenter une étude préalable, un programme prévisionnel et en fin de campagne il doit y avoir bilan agronomique. Les agriculteurs ont des craintes pour leurs terres, les agro-industriels pour leur approvisionnement contractuel, les consommateurs pour la qualité finale du produit. L'agriculteur est donc pris entre deux mauvaises solutions : faire confiance au pilote de station sans pouvoir intervenir et opter pour l'épandage en prenant des risques ; le microbiologiste dit OK car c'est une destination logique et pertinente des boues comme retour au sol (sauf que la boue peut conduire au déséquilibre des éléments du sol et au déséquilibre de flores telluriques entre les autochtones et les allochtones). Mais les cahiers des charges des Agro-industries[24] sont de plus en plus restrictifs et contraignants, imposés qu'ils sont par la grande distribution (image). L'opinion publique craint par ignorance et le consommateur fait l'amalgame entre agriculture et risque « boue ».

En épuration, plus on travaille bien (épuration à plus de 60%) et plus on produit de boues (60% de croissance bactérienne pour 40% de combustion/minéralisation). Les boues présentent des atouts à l'épandage. Elles terminent la filière « Eau » qui est très organisée et très expérimentée. Le savoir-faire (dimension industrielle) en matière microbienne est très performant, les réseaux de collecte sont déjà en place et bien compartimentés (industries, agro-industries, communautés urbaines). Le grand

[24] Normes ISO 9000 sur la qualité ; la suspicion se porte sur l'agriculteur car, avec le sol et les pratiques culturales, c'est lui qui gère la partie cachée du produit consommé.

handicap vient de l'âge des réseaux et des mélanges des eaux polluées : la qualité des boues reflète évidemment la qualité des eaux traitées. Le mélange des eaux (industrielles/urbaines ; pluviales/usées ; boues I/boues II, *etc*) conduit inévitablement à une baisse de qualité des boues (y compris % de MS) et surtout à une déresponsabilisation en amont, c'est-à-dire de ceux qui fournissent les eaux usées (artisans, garages, peintres, *etc*). Les boues se révèlent être de bonnes matières fertilisantes (apports en N, P, S, Mg, Ca), un engrais peu coûteux. On dit qu'à azote égal avec le fumier, la boue apporte plus de calcium, de magnésium, de phosphore. La teneur en azote standard est de 57 kg d'azote N_2/T de MS soit 8,2 kg d'azote total/m^3 de boues à 14,6% de siccité. On y trouve essentiellement de l'azote organique et de l'azote ammoniacal. Le phosphore est l'élément du calcul pour l'épandage ; pour un bon apport, il faut 100ha pour 100 T de MS à 5% de P. Les boues stabilisées ont un bon pouvoir chaulant ; elles apportent au sol des modifications physiques, chimiques et biologiques en réduisant l'acidité. Le chaulage peut compenser l'export.

La surface épandable est calculée comme la SAU = surface agricole utile ; elle tient compte des sols inaptes, des pentes et des vallées. La SAU est la surface totale potentiellement à disposition par l'agriculteur. Exemple : dans la Somme, 94% des boues de STEP de 2001 ont été épandues sur 1% de la SAU. Le retour au sol de la matière est une destination normale (fusion de 2 paracycles). Un sol agricole peut perdre 2 à 5 T de terre/ha/an et parfois beaucoup plus (10 à 30T). Les prairies sont bien adaptées à l'épandage (minéralisation de l'azote au fur et à mesure des besoins et de la pousse de l'herbe). La boue peut être aussi orientée vers la valorisation agronomique en sylviculture (courte rotation), pour la réhabilitation de sites dégradés par végétalisation (talus, autoroutes, pistes de ski).

Exemple concret de programme dans un contexte de mauvaise image : les 57 kg d'azote précédent sont à 70 – 90% sous forme organique et 10 – 30% sous forme inorganique (ammoniacale) ; 60% de la forme ammoniacale se trouvent dans la solution du sol et about à la plante sous forme assimilable (oxydée), le reste est perdu par volatilisation ; 40% de l'azote organique sont minéralisés la première année, le reste les 2 années suivantes. On dit que 30 à 50% de l'azote apporté par la boue est utilisable dès la première année ; l'excès de chaulage fait perdre l'azote par volatilisation d'ammoniac. Le phosphore est apporté à hauteur de 48kg sous forme P_2O_5/T de boue MS, soit 7,01 kg/m3 de boue à 14,6% de siccité avec 50-60% utilisables la première année ; la boue fait mieux que les fumiers en azote sauf le fumier ovin, mieux en phosphore aussi sauf le fumier de volailles, mais nettement moins bien en potassium (perdu dans la partie liquide). Le cahier des charges des agriculteurs est de plus en plus restrictif ; les délibérations des conseils municipaux montrent de plus en plus d'hostilité ; les performances des STEP sont insuffisantes : il faudrait viser au moins 65% de dépollution par boues activées. La règlementation (1997) correspond à l'extension de la loi sur l'eau de 92 : les épandages sont réalisés après des études préalables de faisabilité (valider le périmètre choisi, suivi de traçabilité, bilan agronomique) ; les boues ont subi un traitement visant à réduire la fermentescibilité et le risque sanitaire ; elles doivent présenter peu de teneur en CTO (composés traces organiques) ; prévoir une enquête publique ; matériel d'épandage défini ; épandage interdit certaines époques de l'année et sur sols en pente : autorisé au printemps (mars, avril) et fin d'été (août, octobre). Une solution alternative doit être prévue en cas d'empêchement. Faire un programme prévisionnel d'exploitation.

La Classification des boues est assez complexe : on distingue les **boues activées** (Londres, 1914) selon un procédé d'épuration en bassin aéré dans lequel on réalise une culture intensive de populations bactériennes épuratrices en conditions non limitantes. L'unité de travail est le flocon homogène (grumeaux) ; les flocons + les eaux à traiter forment la liqueur mixte. La production moyenne est de l'ordre de 150m3/1000 hbts.

Les **Boues encombrantes** correspondent à la prolifération des boues par dysfonctionnement (excès de carbone) jusqu'à débordement et prise en masse (*bulking*) ou gonflement (bactéries âgées, trop de filamenteuses, déséquilibre de flores).

Les **Boues secondaires** sont des boues décantées après traitement biologique (bassin II) dans le décanteur II. Elles contiennent des matières organiques dominantes (elles sont assimilées aux boues biologiques) ; on y trouve beaucoup de levains épurateurs (c'est la biomasse épuratrice qui s'exporte).

Les **Boues primaires** sont les boues décantées dans le décanteur primaire (70-90% des matières décantables après un seul traitement physico-chimique (coagulation, décantation, sédimentation) : ce sont des boues brutes, hétérogènes à forte orientation minérale.

Les **Boues mixtes** forment un mélange en tout ou partie de boues primaires à des boues biologiques ou secondaires en excès (= boues fraîches). On confond souvent boues mixtes et boues fraîches ; en réalité il vaut mieux dire boues mixtes = boues non stabilisées.

Les **Boues recyclées** sont des boues de recirculation : ce sont en partie des boues bactériennes (secondaires) contenant les levains de la station et utilisées pour ensemencer les autres secteurs et autres bassins de traitement II. Ces boues contribuent à construire un inoculum de levain de STEP.

Les **Boues en excès** : c'est le solde de boues entre le volume constant de boues nécessaire sur place et le flux de boues produites et/ou entrantes. C'est le volume à exporter. C'est l'excès de boues secondaires ou assimilées telles.

Les **Boues physico-chimiques** sont extraites d'un décanteur en aval d'un bassin de coagulation-floculation par procédé physico-chimique (perchlorure de fer ou chloro-sulfate de fer).

Les **Boues stabilisées** ont subi un traitement d'affinage par valorisation (compostage, méthanisation). Les Boues chaulées sont stabilisées par voie chimique en vue d'abaisser nuisance et acidité (= boues hygiénisées) ; le dosage est en moyenne de 50mg de chaux/litre de boue ; parfois jusque 150mg/L (traitement *Low-Lime*).

Les **Boues solides** ont une siccité supérieure à 35% de MS ; on dit solide de 25 à 80% de MS ; on obtient 80% après séchage thermique ou filtre presse.

Les **Boues liquides** ont une siccité jusque 7-10% de MS ; la moyenne observée est plutôt à 2-3% de MS ; on parle de boue épaissie à partir de 4-5% jusque 10%.

Les **Boues pâteuses** autour de 18% de siccité en moyenne (entre 12 et 25%).

Les **Boues sèches** au-delà de 80% de MS jusque 95% (peu pratiqué en France). Les Boues gravitaires sont obtenues sur lits de séchage.

Les **Boues déshydratées** ont de 15 à 30% de MS par filtration ou centrifugation, elles sont excellentes pour le compost La valorisation des boues est aérobie par compostage ou anaérobie par méthanisation sauf en présence d'halogènes ou d'excès de chaux. Le conditionnement en briquettes sert au chauffage comme combustible (5 fois plus cher que l'épandage).

Risques élémentaires. Les boues produites en STEP contiennent des matières organiques, des produits de lyse microbienne (MII) et une forte biomasse bactérienne (MI). Avant toute utilisation, on doit vérifier leur innocuité *via* la recherche des ETM (éléments traces métalliques) ou de CTO (composés traces organiques). Les ETM ont une origine d'activité artisanale ou industrielle, rarement domestique ; les processus épuratoires éliminent 60% des ETM par sédimentation ; ils sont indésirables car potentiellement contaminants de la chaîne alimentaire *via* les plantes cultivées (cela concerne moins de 1% des boues) ; les éléments visés sont le cadmium, le chrome, le mercure, le plomb et quelques autres. Les activités domestiques peuvent apporter du zinc, du cuivre, du nickel, du plomb, du cadmium ; mais c'est surtout les médicaments et la corrosion des réseaux, les pluies sur les toitures et les shampooings qui apportent des ETM. Le fer est à double tranchant : à faible dose (moins de 1mg/L) il est utile aux ferments, au-delà, il ralentit la physiologie microbienne de 30% (biofixation, coagulation, précipitation. L'excès d'ETM interdit la méthanisation. Les CTO visés sont les HPA (hydrocarbures polycycliques aromatiques) et les PCB (poly-chloro-biphényl). Il n'y a pas de vraies données sur la chaîne bactérienne du sol sinon l'empoisonnement, pas de montée dans la chaîne végétale.

Risques pathogènes. On considère des germes témoins ou cibles comme les entérocoques, *Salmonella, Legionella*, *Escherichia, Clostridium, Giardia, Ascaris*, des virus entériques). La montée du pH à 13 par chaulage (ou amendement calcique) et le séchage à 90°C garantissent du risque pathogène avec une très forte fiabilité ; encore que le chaulage à pH 12 montre une résistance de 10 jours des helminthes et des spores de *Clostridium*, le reste étant détruit en quasi totalité. La systématique des pathogènes est rapidement la suivante : parmi les bactéries, on note *Salmonella* agent de fièvre typhoïde et paratyphoïde (ABC), agent de septicémies, fièvres, abattements ; source : eau contaminée ; agent de gastro-entérites avec 2 jours de diarrhée sévère. *Vibrio cholerae*, très mobiles, agent de diarrhées profuses, vomissement, douleurs, mort (souvenir de l'épidémie de 1892 à Hambourg, 10000 morts, en cause, les sables à filtre lent). *Legionella*, décrite dans les boues, s'abrite dans les amibes. *Escherichia coli*, saprophyte du tube digestif, souvent résistant dans le milieu hydrique. *Campylobacter jejuni*, germe le plus souvent en cause dans les gastro-entérites. *Yersinia enterocolitica*, germe opportuniste contaminant par les déjections de porcs et lapins. *Shigella dysenteriae*, mortalité de 20%. *Enterobacter*, agent de cystites et de méningites. Des *Pseudomonas* opportunistes, infections ORL . *Aeromonas hydrophila*, opportuniste et de surinfection. *Clostridium perfringens*, agit par ses toxines ; actif dans le botulisme aviaire. Des microorganismes parasites et « maladies à protozoaires » : *Cryptosporidium parvum* (coccidies), produit des oocystes infectants très largement répartis (réservoir = animaux domestiques, kystes résistants aux traitements chimiques), présent dans des eaux de surfaces (20000 cystes/100L), des cas de contamination dans l'Ain ; infection grave, intense activité protéolytique, transit torrentiel, diarrhée rebelle et bactéries opportunistes, présence dans les boues ; crampes abdominales, nausées, anorexie sévère. *Giardia lamblia*, *intestinalis*, diarrhée printanière aqueuse (giardiose, lambliose), avec réservoir chez les chats, chiens, castors, moutons, en montée dans les pays occidentaux, se produit notamment en montagne (torrents) pour des eaux réputées pures ; 500000 cas

dans le monde, contamination par les kystes, ventouses, dékystement dans l'estomac. *Entamoeba dysenteriae*, *Acanthamoeba*, amibiases, méningites, encéphalite amibienne, entérocolite, diarrhée sanglante, abcès au foie, affection grave mais il existe des porteurs sains ; se produit en zone d'épandage de boues. *Naegleria* des eaux chaudes de piscines, lacs et bains chauds ; infection du système nerveux central, méningo-encéphalite amibienne primitive (MEAP) avec issue souvent fatale ; se produit aussi pour le ski nautique. Des *Helminthes* : oxyures (en hausse) ; des *Ascaris*, toux et complications ; Ankylostome (transcutané). Anguillules (*Strongyloïdes*). Des Filaires (*Dracunculus*) intermédiaire : le Cyclops, agent de filariose. *Onchocerques*, agent d'infections oculaires ; des Schistosomoses (=bilharzioses) dans les vases, boues et eaux (1 million de morts/an dans le monde). Des Distomatoses (douves), contamination par des plantes aquatiques. *Taenia* par ingestion de viande et de poisson contaminés. Des entérovirus humains à ARN (*Picornaviridae*) dont l'agent de la poliomyélite et des *Rotavirus* de gastro-entérite et de diarrhées brutales et déshydratation de l'enfant. Les virus entériques sont très nombreux dans les boues de STEP avec une survie de 3 mois sans traitement. On trouve aussi des virus des hépatites (peu en Europe)

Attention à l'anonymat des eaux en centrale d'épuration, il faut responsabiliser :1% des boues ou moins sont potentiellement toxiques (contaminées). Et quand on a tout essayé et pas trouvé de débouché, le mieux est de les mettre boue à boue !

Le risque azoté, le risque soufré et le risque phosphoré.

L'azote est un macroélément primordial et très mobile en milieu liquide sous forme nitrate. Il semble que ce soit la forme « nitrite » qui soit principalement toxique pour nous. Les nitrates anthropiques amenés au milieu tiennent à 2/3 pour l'agriculture et 1/3 pour les industries et les particuliers. On compte 12 à 15g d'azote par jour et par habitant dans l'environnement (urines, protéines, ammoniac). On considère que près du 1/5 des nitrates utilisés comme engrais échappent à l'agriculture pour polluer le milieu (eau principalement, l'oxygène étant le curseur). Pour notre plus grand bienfait (et notre punition), les bactéries possèdent collectivement toutes les stratégies métaboliques vis-à-vis de l'azote (diazotrophie, exométabolisme, protréolyse, chimiosynthèse lithotrophe, respiration anaérobie, assimilations diverses, mobilisation, dépolymérisation). Le risque azoté est très géographique et inféodé à l'eau douce (réserves) et aux rivages. L'océan contient entre 300 et 550 mg de nitrates/L contre 2500 de sulfates et 33000 de sodium. L'eau du robinet était longtemps maintenue à teneur inférieure à 44mg/L de nitrates jusqu'à ce que la teneur dans les ressources augmente de telle façon que le nouveau plancher devienne 50mg/L. Depuis la Directive de décembre 1991 (application 94) des zones vulnérables ont été délimitées et de bonnes pratiques agricoles codifiées ; sauf qu'il y a 74 départements touchés par l'azote et que les actions renforcées dans les ZES (zone d'excédent structurel) montrent des bénéfices modestes. On indique que la DJA (admissible de nitrate) serait de 250mg pour 70kg et que la dose ingérée serait de 175.

Pour la santé, le risque **nitrate** est avéré. Les nitrates assimilés sont transformés en nitrites par des germes entériques avec formation de nitrosamines réputées mutagènes et indirectement cancérigènes. Une partie des nitrites interfèrent avec l'hémoglobine pour conduire à la méthémoglobinémie grave

chez le nourrisson. L'azote ammoniacal est directement toxique pour les systèmes digestif et respiratoire ; indirectement aussi avec production de chloramines causant des nausées et vomissements. Dans le milieu, l'excès d'ammoniac conduit au salpêtre (constructions) et à l'eutrophisation des eaux (nitrates).

Le traitement des **pollutions azotées** se pratique dans l'eau et la première opération est la nitrification qui est une oxydation aérobie lithotrophe obligée ; elle est donc dissimilative pour l'azote qui devient nitrate mais assimilative pour le carbone (dioxyde) qui peut manquer. La réaction est O_2 dépendante. La dénitrification des eaux est anaérobie et bactérienne ; c'est une respiration anaérobie dissimilative pour l'azote (libéré comme gaz, volatilisation), en partie assimilative pour le carbone organique qui peut manquer et nécessite la présence d'acides aminés ou d'ammoniac ! C'est une fonction procaryote presque toujours alternative sinon facultative. Dans une station d'épuration, si les nitrates sont abondants il peut y avoir compétition entre les dénitrifiants et les coliformes dénitratants et il y a production de nitrites et de coliformes !

Le phosphore est un élément « malin ». Il est presque toujours caché derrière l'azote, presque toujours plus désastreux et presque jamais incriminé directement (pourtant le maillon faible du cycle de la matière). C'est un élément fortement limitant de la photosynthèse et des microorganismes (P = élément support énergétique de la cellule vivante). Le phosphore est assimilé sous forme phosphates. Les eaux à proximité des activités humaines reçoivent 3g au moins de Phosphore/jour/habitant ; l'essentiel venant des matières fécales (y compris animaux d'élevage). La circulation du phosphore est presque toujours à sens unique : du continent vers l'océan et c'est à l'interface (continent/océan) que les choses se compliquent. Dans l'océan, la teneur en phosphates varie de 50 à 100mg/L ; plus en profondeur qu'en surface. Les bactéries sont capables de « mobiliser fortement » le phosphore en conditions aérobies grâce à de nombreux systèmes d'absorption et de transport (et de réserve sous forme volutine) ; la démobilisation (relargage) est anaérobie (stress bactérien). Conclusion : le phosphore est essentiel à toutes les cellules vivantes mais ce sont les plus opportunistes qui vont le capturer (autotrophes au carbone, au carbone et à l'azote, des bactéries). Le phosphore de la pollution en environnement vient des fertilisants, des déjections (origine agricole) et des détergents (adjuvants). Il y a 5 fois plus de phosphore dans les eaux à proximité des activités humaines qu'en leur absence (parfois beaucoup plus). On parle d'eutrophication (= eutrophisation) pour la combinaison d'addition de phosphore et d'azote dans un milieu aquatique (plutôt lentique). Les travaux (depuis 1974) sur la Loire et le lac d'Annecy sont des modèles d'école. Il y a augmentation considérable de la biomasse organique, pullulation du phytoplancton et augmentation considérable des populations bactériennes de recyclage (métabolisme associé). Par conséquent prélèvement de l'oxygène et passage à la putréfaction (les organismes comme les poissons sont privés d'oxygène et meurent). En amont du phosphore, les rejets glucidiques contribuent à l'eutrophisation. Sur de nombreuses plages bretonnes, l'eutrophisation conduit à l'explosion (exubérance) d'algues (macrophytes) sous forme de marées vertes (ulves, entéromorphes, fucus) avec obligation de ramassage. Il peut s'y ajouter des « fleurées » bi-autotrophes et donc cyanobactériennes !

Les sources de phosphates répandues dans l'environnement sont nombreuses à être désignées depuis les années 70.

1. En premier lieu les déjections issues des élevages et notamment des volailles.
2. Également des amendements et engrais sur des terres analysées comme carencées. Néanmoins certains phosphates naturels qui ont été utilisés (4 à 19%) et des engrais fabriqués contiennent de l'aluminium qui peut intoxiquer le bétail (chlorure d'aluminium) et qui est incriminé chez l'homme dans la maladie d'Alzheimer). L'aluminium et le fer se combinent au phosphore en le rendant difficilement assimilable ; l'agriculteur augmente donc la dose de phosphates et c'est l'engrenage ; il y a augmentation de l'excrétion fécale du phosphore et contamination de l'environnement. Le promeneur inattentif constate qu'il y a plus d'éléments verts dans les rivières et les étangs mais ne s'est pas aperçu du glissement irréversible des diatomées vers les algues vertes, puis vers les cyanobactéries puis vers les dinoflagellés.
3. Mais également les eaux ménagères et industrielles contenant des agents dispersants (aujourd'hui les agents dispersants doivent être biodégradables) et des adjuvants phosphatés. Citons l'exemple des lessives à partir des années 50 et l'affaire du Tide : la quantité de phosphates véhiculée par les rivières est multipliée par 2 en quelques années.
4. L'effet combiné des apports de sulfates, phosphates et nitrates pour tout un tas de « bonnes raisons » conduit à l'acidification des eaux de surface (lacs, étangs, rivières) dans beaucoup de régions et notamment peu calcaires. Les pluies acides apportent aussi leur contribution.
5. Du phosphore 32 peut se trouver dans le rejet des centrales atomiques (eaux) et entrer dans la chaîne alimentaire.

Les ***Blooms*** correspondent aux phénomènes des eaux colorées et efflorescences planctoniques, qui sont des explosions photosynthétiques en milieu aquatique. Ce phénomène touche le maillon 1 (producteurs) du cycle de la matière et peut gagner les consommateurs (péridiniens, dinoflagellé) qui développent des vagues toxiques. On rapporte la légende du Sang des Bourguignons au lac de Morat en 1825 qui a vu l'explosion sous forme de floraison d'eau de la cyanobactérie *Oscillatoria rubescens* dont l'étude a montré l'évolution hypereutrophe du milieu avec la consommation totale d'oxygène. La solution de la jacinthe d'eau est une peste épouvantable (sauf bassins contrôlés) et la méthanisation est la seule solution. Les Eaux rouges d'été sont des explosions algaires dues à un groupement de pyrrophycophytes à xanthophylles et annexes ; on y trouve des péridiniens toxiques (inclassables) et des *Ceratium*. De nombreuses cyanobactéries sécrètent aussi des toxines (substances allélopathiques, neurotoxines, anatoxines, hépatotoxines) et de nombreuses espèces sont bio-luminescentes (*Noctiluca*). Bon an mal an, il y a près de 3000 cas d'intoxications en France (Languedoc) dues au franchissement du seuil de toxicité des eaux à dinoflagellés (200/L). La contamination des bivalves est redoutables (huîtres). L'explosion des dinoflagellés est probablement liée au métabolisme associé de bactéries qui libèrent dans le milieu de la thiamine, de la biotine et autres vitamines.

La déphosphatation des eaux est assez compliquée et se pratique comme indiqué ci-dessus en deux temps : phase anaérobie de vidage des cellules par stress et phase très aérobie de mobilisation totale ; le phosphore est dans les boues. Mais comme la manœuvre est compliquée et qu'elle interfère avec

l'azote, le soufre et le carbone, il n'est pas surprenant de constater que le technicien de STEP joue la carte chimique avec la précipitation au perchlorure de fer et à la chaux.

Le soufre et les sulfates. Dans l'eau de mer, au niveau du sédiment, le soufre sulfate est 100 fois plus abondant que l'oxygène ; la respiration sulfate (sulfato-réduction) est donc en phase avec les conditions en produisant H2S et les bactéries du métabolisme du sulfate sont très denses (10^5/ml). Le soufre n'est jamais un facteur limitant en milieu hydrique et presque toujours une source d'ennuis (excès) ; en présence de fer il y a formation de sulfure de fer noir (vases et boues noires). Il peut arriver au niveau de l'océan qu'il y ait « *bubbling* » ou pétillement en surface par formation de particules soufrées. Une partie du soufre aquatique est autochtone, mais l'essentiel est d'origine anthropique (allochtone), parfois volcanique. Le soufre est en cause dans l'évolution d'un milieu oligotrophe vers un milieu eutrophe (thiosaprobe, excès de carbone) et toujours en cause dans le processus de stratification du milieu aquatique (quasi irréversible). Les bactéries sulfato-réductrices sont étudiées pour leur capacités dépolluantes des sédiments (estuaires, phénols, mono- et di-chlorophénols). Des *Desulfobacterium* sont capables de dégrader des hydrocarbures lourds mais il peut s'accumuler de l'acide benzoïque non attaqué. C'est aussi à ce sujet que l'on a vu apparaître des noms codés de germes (asystématiques) pour causes de brevets et confidentialité !

Le soufre est toujours en cause dans les phénomènes de smog (particules solides et liquides de toute nature en aérosols). Le soufre est sous forme dioxyde (SO2). Avec la suie et l'eau le dioxyde de soufre fixe le béryllium, l'arsenic et le molybdène pour former le smog acide agent de bronchites chroniques (smog de Londres de 1952, 4000 morts). Le dioxyde de soufre en présence d'oxydes d'azote et d'ozone produit des smogs oxydants en présence d'UV et conduit aux PAN (péroxy-acétyl-nitrate) qui dégradent les molécules de la photosynthèse.

Quelques risques technologiques à incidence biologique

Le risque OGM. OGM signifie Organisme Génétiquement Modifié. Un OGM correspond à un organisme dont le matériel génétique a été modifié autrement que par multiplication végétative, fécondation expérimentale ou recombinaison naturelle. On parle de modification **intentionnelle** du patrimoine génétique. PGM correspond à Plante Génétiquement Modifiée ; le processus de transfert est appelé **transgenèse** (plante transgénique). La méthode était appelée génie génétique ; aujourd'hui on dit biotechnologie qui procède des techniques de la biologie moléculaire.

Cette méthode de type « **meccano** » est réalisable grâce notamment à l'universalité de la double hélice d'ADN et à l'universalité du code génétique. Reste que l'organisme d'accueil doit différencier l'ADN génétique de l'ADN trophique.

Probablement le 1er OGM végétal exploité a été la **tomate** Calgène Flavor (1994, USA, conservation, reste ferme après récolte). Parmi les **maïs** de la polémique (1997), il y a le Novartis portant 3 gènes introduits (Bt pour la protéine toxique contre la pyrale causant 10% de pertes, 1 de résistance à un herbicide (Basta), 1 de résistance à une ampicilline comme marqueur). En 1997, 54% des OGM mondiaux portaient une résistance à un pesticide (herbicide). Cette orientation américaine vers les « mauvais OGM » a initié une forte opposition dont les restes les plus chauds sont en France (54% des OGM en France s'accompagnent de + de chimie contre 1% de meilleure qualité). La France de 1997[25] hésite : Alain Juppé refuse l'autorisation maïs ; Lionel Jospin signe l'autorisation en novembre. Betterave et colza restent en attente. L'autorisation est assortie d'une avalanche de précautions (mesures d'information, conférences de consensus, panel d'experts, système de biovigilance, collecte de données, principe de précaution, autorisation au cas par cas, suivi des risques). Bref, une autorisation en forme de coup de frein vers un stop bien dissuasif. L'Europe desserre l'étau depuis 1998 et vise à protéger les brevets. Le consommateur doit recevoir une information sur l'étiquetage.

Les OGM, à quoi ça sert ? Par exemple à équiper une plante de propriétés intéressantes ou recherchées (portées par une espèce qui ne peut pas croiser). Cas élémentaire : résister à des insectes ravageurs (pyrale, teigne, noctuelle), à des champignons parasites (*Solanum*). Cas annexe : **tabac** et taux de nicotine ; par exemple à développer des arbustes de rotation rapide pour dépolluer ou produire du papier (peuplier, saule) ; par exemple chez les bactéries à produire des enzymes, des **acides aminés** et des molécules rares ou d'intérêt.

Par exemple mener en parallèle recherche fondamentale et recherche appliquée sur des objectifs louables : (1) pour un progrès dans la compréhension des fonctionnements génomique et génétique ; (2) obtenir des produits de gènes et soigner (insuline, protéines, globines), alimentation du bétail (tryptophane, lysine) ; (3) réparer des structures endommagées (ADN, maladies orphelines) ; (4) produire en quantité des molécules « propres » (chymosine de veau par *E. coli* pour le caillé, cellulose) ; (5) plus loin, construire des plantes partenaires économes d'azote et d'eau.

---

[25] R Poulenc, maïs résistant au *Roundup* (glyphosate), résistant à la pyrale et à la sésamie (maïs Bt) ; panel d'experts, système de Biovigilance, Livre blanc.

Dans le domaine végétal, le passage par le laboratoire et la biotechnologie permet de gagner 4 à 5 ans ou + sur les méthodes ordinaires pour une manipulation. Quitte à utiliser la stérilité et quitte à revenir aux croisements classiques après.

Si des champs de maïs sont encore fauchés aujourd'hui avec médiatisation et bonne conscience, la recherche en thérapie génique reçoit des dons, le citoyen s'insurge que les maladies orphelines ne soient pas prises en compte et les bactéries modifiées indiffèrent tout le monde dans leur fermenteur industriel confiné. De l'importance de l'information. Dans pas longtemps, il faudra recourir aux dons pour sauver la pomme de terre ou le riz. Et des écologistes supplieront les savants de produire des OGM pour sauver la biodiversité.

Il y a des objectifs remis en cause : la résistance aux herbicides (maïs et augmentation naturelle au glyphosate) et aux pesticides en général. Le transfert de gènes marqueurs de résistance aux antibiotiques est montré du doigt. Les gènes tronqués ou erronés (de synthétase de pomme de terre) pour éviter l'expression du gène normal (et produire un amidon favorable à l'industrie).

Les principales plantes cibles sont : la tomate (rester ferme après récolte), le maïs (23%), le soja (57%), le coton, le colza, la pomme de terre, le tabac. 60 millions d'ha en 2002 (monde, dont 42 aux USA), + de 1000 ha en betterave en France en 2005 ; peut être 40000ha en tout en France ?

Les OGM, comment ça marche ? (le point de vue du microbiologiste, référence aux travaux de P. Berg, 1972). Nous traitons ici du transfert indirect théorique par vecteur microbien ; pas de transfert direct par biolistique ni de fusion cellulaire ; il y a au laboratoire toute une série d'opérations compliquées à taux de réussite variable.

Repérage de **gènes d'intérêt**, par exemple ***Bt*** pour le maïs (gène emprunté à *Bacillus thuringiensis* produisant des protéines (produits du gène, bacille sporulé) dont un groupe a des propriétés insecticides, activité létale pour un large spectre de cible, activité létale pour les moustiques, activité cytolytique) ; isolement après repérage par enzymes de restriction. Le Bt est facile à cultiver en fermenteur ; ses propriétés **insecticides** sont connues depuis 60 ans ; idem pour *B. popilliae*. Par exemple aussi, de gènes d'élicitine pour augmenter les défenses du végétal contre les champignons (*Phytophtora*/Solanacées).

Choix d'un vecteur de **clonage** ou navette (= transporteur d'ADN exogène). 4 types potentiels : plasmides, cosmides, phages, chromosomes artificiels. C'est généralement le plasmide pBR 322 de *E. coli* portant la résistance à la tétracycline, à l'ampicilline ou les 2. Avantages : facile à extraire ; la ou les résistances sont des marqueurs et ce plasmide présente de nombreux sites de **restriction** (pré-découpage ou pointillés génétiques).

Recherche d'un **révélateur** de réussite ou de révélateurs (= **marqueur**, positif/négatif). Dans l'ordre chronologique, c'est le marqueur de résistance aux antibiotiques (kanamycine, ampicilline, néomycine) qui a été utilisé puis le marqueur **enzymatique** (libérant un produit coloré), puis un marqueur de phosphorescence (luciférase). On parle de gènes rapporteurs confirmant la transformation.

Nécessité d'un **multiplicateur**. Il s'agit de produire en grande quantité de nombreuses copies du montage génétique. C'est en général *E. coli* en fermenteur pour des raisons d'économie, de temps de

génération court (en croissance équilibrée plutôt qu'exponentielle ; attention au phénomène de cure. C'est dans cette phase qu'il peut y avoir contamination, conjugaison ou transformation !

Construction de **l'intermédiaire** « Gène-Plante » *via* le **plasmide Ti *d'Agrobacterium tumefacien*s**. Ce plasmide (tumorigène) est désarmé pour l'induction tumorale mais porte des gènes codant pour des opines, pour des facteurs de virulence, pour la synthèse de phytorégulateurs et pour des facteurs de pontage (insertion sur les chromosomes de la plante hôte). Ce Ti recombinant désarmé est obtenu par conjugaison avec *E. coli* ; on comprend aisément que les % de réussite de transformation soient faibles. Premier succès, Van Montagu, Gand, 1983 avec ADN-t (de transfert).



Les politiques et les responsables ont lancé il y a plus de 40 ans des programmes de recherche sur le sujet avec des travaux qui commencent à donner de vrais résultats (maladies des végétaux), mais la société a été rattrapée par des grands accidents à répétition (vache folle, sang contaminé, dioxine, amiante, hormone de croissance) et l'amalgame a été rapide pour condamner les OGM. Il y a actuellement exploitation industrielle de bactéries OGM : personne ne dit rien ou fait semblant d'ignorer. Il y a des projets réussis d'OGM animaux avec des promesses à propos de médicaments, d'organes de substitution, de maladies orphelines, de lait maternel). Et les militants fauchent les OGM dans les champs ! (procès à Agen du 8 janvier 1998, 3 membres de la Confédération paysanne, entre 6 et 7 millions de francs de dégâts pour Novartis, un témoin cité, le Pr Gilles Seralini). L'ignorance est la situation la plus partagée et tire la science vers le bas ; la société n'attend que cela.

Nous allons vers une ligne de partage entre les « bons OGM » et les « mauvais OGM ». **Principe de précaution**[26], levée du moratoire et crainte de **l'eugénisme** veillent. Les bons OGM produiraient des médicaments en consommant moins de pesticides, d'engrais et d'eau ; les très bons OGM iraient soigner sur place des malades et ce seraient des bactéries et des puces. Les mauvais OGM seraient ceux qui drainent le plus de chimie. Pourquoi ne pas considérer la construction et l'exploitation d'OGM comme une industrie pointue (comme la construction d'avions ou de téléphones) plutôt que relevant de l'agriculture ? Pourquoi ne pas fédérer les réseaux de biovigilance (maladies, épidémies, pollen, qualité de l'air, allergies, OGM) et positionner ce réseau comme responsable entre l'état qui légifère et la recherche qui trouve sur une carte blanche d'objectif ; les applications peuvent être proposées au débat et adoptées ou non au cas par cas. Le drame de la confusion actuelle, c'est que le sujet est éparpillé entre savants qui se trouvent sous contrat, multinationales qui ont l'argent, l'audace et l'influence, politiques coincés entre l'autruche et l'escargot, société yoyo qui a peur de tout comme on lui a asséné par amalgame et catastrophisme.

---

[26] Le Principe de précaution est reconnu par la Charte mondiale de la nature adoptée par l'assemblée générale des Nations Unies en 1982 ; consacré en juin 1992 par la Conférence de Rio dans son principe 15 et figurant au Traité de Maastricht ; il s'appuie sur des rapports d'experts mais il est mis en œuvre par des gestionnaires et des politiques ; de quoi faire du sur place pendant longtemps et la conscience bien tranquille. Le principe suit immédiatement le travail de la Commission de l'Europe de mars 1992 qui définit le Développement Durable comme une politique et une stratégie visant à assurer la continuité dans le temps du développement économique et social, dans le respect de l'environnement, et sans compromettre les ressources naturelles indispensables à l'activité humaine ; en 1996, il y a 3 objectifs complémentaires : équité sociale et solidarité, efficacité économique, préserver et améliorer l'environnement, préserver les ressources pour le long terme.

Les scientifiques ayant réfléchi au sujet sont unanimes : les OGM sont la seule solution d'une thérapie génique efficace dont le danger à terme est inconnu.

La diversité face à la réglementation

La diversité est une chance de limiter et de **circonscrire les risques** en cas d'accident, la **sécurité absolue**, la massification uniforme par la norme est une aberration, parole de bactérie, la certitude de préparer une pandémie majeure. Massifier les produits de consommation (mondialiser) et abolir les diversités sont des imbécillités cumulées. Nous y allons tout droit et c'est moins cher. La Nature a organisé la diversité dans la compétition : les plus forts subsistent sur leurs mérites jusqu'à ce que plus fort ou plus malin les remplace, c'est le relais des **courbes d'action** inhérente aux objets et êtres terriens. La diversité est une richesse facile à mesurer concrètement : je suis sûr que vous reconnaissez quelqu'un par la voix, par un ou deux mots prononcés. Instantanément vous avez fait le tri et sélectionné une personne sur des milliards possibles. C'est la diversité. La Nature a fait des papillons, des girafes, des crocodiles, des poules et des cocotiers ; elle a mis des millions d'années à modifier, affiner, adapter, évoluer des formes vivantes, à inscrire les progrès dans les gènes[27] et maintenir les fonctions anciennes et l'homme se sent investi des pouvoirs de conduire le train à l'envers et de « **défabriquer »** la diversité.

Nous avons un avantage considérable sur les bactéries à propos de diversité : la sexualité ; les bactéries produisent des armées d'identiques au rythme d'une croissance potentiellement exponentielle ; nous ne produisons que des originaux à l'unité.

[27] On a toujours pensé que le flux d'information allait du gène au milieu qui faisait le tri ; nous savons par de multiples exemples (végétaux, animaux, microorganismes) que le flux inverse se produit : d'inscrire dans le génome des messages assénés par le milieu.

Conclusion provisoire

Contre la politique de la table rase : ajouter le passé au présent. Adapter plutôt qu'empiler ? La microbiologie va s'imposer comme la science de référence, l'arme absolue, omniprésente ; pourtant, il faut tourner la page de la microbiologie pasteurienne. Pasteur a inventé la microbiologie générale et Koch la bactériologie. Vers 1860 et vers 1880. Les marques de l'autorité du savant ont maintenu la discipline 150 ans sans voir pointer la moindre audace de toucher au moule. Aujourd'hui il est temps de garder l'esprit et d'améliorer les méthodes. Par exemple de définir des règles de **nomenclature** intelligente et universelle. Sans passer par le raccourci d'un système d'hommage aux illustres bactériologistes (*Pasteurella, Salmonella, Shigella, Yersinia, Listeria*) à une nomenclature codée par des chiffres et des lettres, voire cryptée par des brevets, ce qui fait dégringoler le système linnéen vers les outils et les travers de chimistes. Continuum ou rupture, il y a deux écoles.

Les meilleures **techniques** d'identification bactériennes sont biologiques et font appel aux cultures sur milieux sélectifs de croissance ; elles exigent du temps, à savoir au moins 18/24h pour les plus rapides (on travaille sur les descendants des échantillons prélevés) ; parfois plusieurs jours ou semaines pour les plus lentes. De nouveaux tests antigéniques, enzymatiques et spécifiques permettent une identification en quelques heures, parfois en quelques minutes. C'est un domaine de recherches facilité par les ordinateurs et les robots, reste à sélectionner de bons **marqueurs**. L'enjeu économique est calculé comme considérable, l'enjeu humanitaire comme accessoire !

Un escalier peu glorieux. Risque et danger : Nous sommes passés en quarante ans de « Osons tout » à « Ne faisons rien ». Aujourd'hui les « quarante sont cuites »[28] et il est établi que le principe de précaution est une excuse honorable pour ne rien faire ; c'est **l'information** et la participation de tous qui seraient les meilleures protections et les consignes aux pratiquants qui offriraient les bonnes garanties. Pire, ne rien faire c'est devenu une habitude d'élu claironnant, encouragé par l'écologie militante qui veut préserver, conserver et protéger une nature qui ne lui appartient pas ; qui la confisque pour des générations au progrès et à l'évolution profitable, obligatoire. Cette écologie-là n'a rien du développement durable ; elle est arrêtée, vitrifiée, périmée. Elle a profité du progrès pour l'enrayer. Elle nous a fait décrocher de la recherche mondiale tous azimuts au grand profit de tous les autres qui nous rient au nez et expérimentent des solutions intelligentes et innovantes. Dans la biosphère, ce sont les aventuriers qui se sont toujours imposés (conquête verticale, océanique, atmosphérique, continentale) et pas les pleutres restés à la caverne. Ils vivent en album photo pendant que défile le film de l'existence. Pourvu que nos petits enfants soient hardis, refondent une écologie brillante et prennent des risques.

---

[28] C'est une auto-citation extraite d'un texte sur la quarantaine qui correspond à l'ouverture des meilleures années de la vie. Le texte traitant par ailleurs et par l'exemple d'une dictature du 4 dans notre monde.

Risque individuel et risque collectif (du rapport sexuel à risque) au repas à la cantine (intoxication) ou au bain à la plage, c'est la connaissance par la formation qui réduit la peur et responsabilise le comportement. En fait la montée de la méfiance vis-à-vis des risques supportés par les citoyens vient principalement de leur **éloignement** à l'implication aux activités de base ou de tradition dans une société qui cultiverait et entretiendrait ses racines. Qui se sent encore concerné par la technologie de production des aliments ? Des remèdes et des médicaments ? Aux procédés de conservation ? A la purification (avant usage) et à l'épuration (après usage) des eaux ? Qui sait encore jardiner et cultiver son jardin ? L'éloignement conduit à la déresponsabilisation. Et les **désenchantements** s'additionnent au fil des crises, des catastrophes et des expériences malheureuses. Un ou deux exemples chronologiques pour illustrer ces propos. L'affaire du DDT à partir de 1953-54 et des organo-chlorés, de l'agent orange déjà cité. Puis viennent les affaires de saturnisme, d'empoisonnement au mercure, à l'amiante, les marées noires.

La microbiologie se nourrit **d'événementiel** ; je propose un florilège des leçons à tirer.

Minamata (= remaniement bactérien). Au même moment (désenchantement, 1953-56) intervient l'affaire de la « **danse des chats** de Minamata » (Japon). A l'origine, une usine d'engrais de 1932 qui oriente sa fabrication vers la production d'acétaldéhyde et de vinyle. Les eaux marines proches sont polluées ; *idem* à Niigata. On estime à 600 tonnes de mercure l'entrée et la remontée dans la chaîne alimentaire jusqu'aux poissons puis aux chats qui sont pris de spasmes : c'est « la danse des chats » ; on rapporte en 1956 sans comprendre vraiment que la consommation de mollusques, crustacés et poissons provoque une **épidémie non contagieuse !** Il y a officiellement 200 morts et des milliers d'invalides ; la proposition est de 450F par enfant malade en 1956, 4500F pour un décès ; l'explication vient en 1971 : les bactéries ont développé des mécanismes de résistance au mercure et ont transformé le mercure en **méthyl-mercure** et en phényl-mercure qui devient mobile avec une partie libérée sous forme métallique (opéron mer) ; il s'agit de *Escherichia coli, Pseudomonas, Thiobacillus, Staphylococcus, Desulfovibrio* ; il peut y avoir volatilisation d'une fraction du mercure qui retourne à l'atmosphère. Un autre accident a fait des milliers de morts en Irak par consommation de blé traité à l'anticryptogamique mercuriel. On savait depuis longtemps le mercure utile en milieu médical (thermomètre au mercure de 1714 de Fahrenheit ; mercurochrome comme antiseptique et sublimé pour stériliser). L'exemple est le même avec le plomb tétra-éthyle (plomb technologique) fixé par les mousses et les lichens.

Les chercheurs centrent alors leurs recherches sur l'écologie, la pollution à dimension planétaire dans un contexte de catastrophes à répétition. C'est l'affaire des **naufrages** et des marées noires (Torrey Canyon, 1967 ; Amoco Cadiz, 1978 ; Olympic Bravery, 1976, Exxon Valdez, 1989) auxquelles s'ajoutent les dégazages sauvages. Puis s'ajoutent les affaires de saturnisme infantile, de l'amiante, des excès de l'azote dans les eaux, les pesticides dans les nappes, le sang contaminé, l'hormone de croissance. Le coup de grâce vient des **dioxines** (1976) et de la « **vache folle** » (ESB, Royaume Uni, novembre 1986, qui rappelle la scrapie du mouton et du bovin depuis 1732, transmissible à l'homme). Que faut-il de plus pour déclencher la peur et le rejet des OGM ? On peut ajouter le péril fécal qui est loin d'être dominé

(15000 enfants en meurent chaque jour), le péril viral de la fièvre jaune, des hépatites, des germes émergents et des germes multi-résistants. Les échanges, les voyages et le commerce aident à la circulation des biens et des flores ! La **mondialisation des flores** va fatalement éliminer des franges de populations et développer des germes sélectionnant les caractères les plus « forts » des souches indigènes.



Les surprises des marées noires (= dressage bactérien). C'est l'exemple à répétition des accidents assimilés à du terrorisme écologique et sont à traiter comme des événements de pollution aiguë. Les marées noires élisent domicile sur des sites aléatoires ; le dégazage sauvage se pratique en douce ; 6 Millions de Tonnes de pétrole sont déversées chaque année dans l'océan (Torrey Canyon, 1967 dans la Manche ; l'Amoco Cadiz, 1978, Porsall, 200000ha de mer touchés, 260000T de cadavres d'aminaux ; Olympic Bravery, 1976 ; l'Exxon Valdez, 1989). La plus grande catastrophe se produit dans le Golfe du Mexique (plateforme Ixtoc I qui explose, 295 jours de fuites). Les hydrocarbures ont tendance à former un film à la surface de l'océan avec effet miroir et imperméabilisation. L'effet catastrophique, c'est de toucher des **lisières** (rivages, estuaires) et par conséquent des zones de diversité élevée et de productivité maximale. 1 litre d'hydrocarbures pollue 1Million de litres d'eau. Les hydrocarbures sont formés de molécules d'origine biosphérique et sont donc biodégradables (à condition de prendre le temps et de rester en aérobiose). Mais comme ce n'est pas beau, l'homme se précipite et plombe le pétrole avec des poudres. Pompée et traitée en aérobiose, la matière hydrocarbure peut être facilement biodégradée par les bactéries à condition de posséder peu de cycles benzéniques. La dégradation dépend essentiellement de la surface de contact entre molécules et bactéries, de l'oxygène et du brassage. Les hydrocarbures à **chaîne droite** sont facilement pris en charge par des *Candida* et de nombreuses bactéries. Simplement le cycle local du carbone va agrandir son cercle et postérieurement la biosphère sera exubérante. N'oublions pas un peu de matière carbonée « facile » pour amorcer la déstructuration et un peu d'azote assimilable avec des oligoéléments. Les hydrocarbures à **cycle benzénique** sont souvent antiseptiques (phénol) et il faut opérer avec des *Pseudomonas* et des actinomycètes pour une ouverture du cycle en C2 (acétate) + C4 (succinate). Les travaux ont permis de sélectionner le plasmide Tol (toluène) catabolique pour le cycle benzène et de déposer le premier brevet pour *Pseudomonas putida*. Le noyau naphtalène est dégradé en salicylate puis en catéchol et en pyruvate + acétate.

Boomerang métallique (assistance bactérienne). L'usage des bactéries pour l'assistance à l'extraction minière est ancienne (biolixiviation, *biomining*) avec de l'eau, de l'oxygène, *Thiobacillus* et une bonne pente. La technique fonctionne très bien pour le cuivre à l'obscurité au Brésil, en Australie et Afrique du sud. Des essais sur l'or conduisent à l'extraction de l'arsenic ! (arsénopyrite d'or) et l'or reste rebelle. Des essais et des réussites ont été rapportés pour le cobalt, le molybdène, le magnésium, le zinc et le fer. Cela motive d'autant plus que l'eau de mer contient naturellement du cuivre, du fer, du manganèse, du sélénium, du zinc, etc… et de l'or. **L'exemple du fer** est intéressant. Dans la nature, le fer a toutes les chances de se retrouver sous forme ferrique (hydroxyde et insoluble). Les bactéries ont développé des systèmes (sidérophores) qui permettent d'encadrer le fer (on dit chélater) et de le faire pénétrer dans la cellule avant de le réduire et le stocker. C'est d'ailleurs une vieille propriété conservée par des bactéries pathogènes pour confisquer le fer de leur hôte victime et l'affaiblir. Des bactéries anaérobies font de

même et y ajoutent la respiration métallique (anaérobie sur oxydes métalliques, *Shewanella*, *Ferribacterium*). Des essais avec *Escherichia* sont très encourageants ; mais catastrophe ! Le fer et le manganèse oxydés dans le milieu formaient des dépôts fixant quantité de métaux **toxiques** et leur réduction spontanée ou assistée les libère (mercure, cadmium, cuivre, plomb). Pire, la plupart des métaux sont sous forme phosphates et le relargage de phosphate conduit à l'eutrophisation du site (+ micropolluants, ETM). Des recherches complémentaires débouchent sur des applications environnementales très intéressantes : par « **métabolisme symétrique** », on peut envisager la **déferrisation** d'un milieu assistée par des groupes microbiens (chlamydobactéries, ferrobactéries, manganobactéries). Il s'agit de favoriser des germes lithotrophes organodépendants en conditions aérobies non limitantes et présence de dioxyde de carbone qui vont extraire l'énergie des matières réduites et les précipiter sous formes d'hydroxydes (rouilles) faciles à décanter et séparer (précipitats). Dans le même esprit on peut réaliser la bioréhabilitation de mines à ciel ouvert abandonnées pour cause de minerais pauvres : en présence de substances d'appoint, fer, cuivre et autres peuvent être récupérés et le site réaménagé. Car le pH de l'endroit peut descendre à 1 ! L'application à l'uranium n'est pas résolue.

Travailler par petites unités et ne pas centraliser ; c'est l'exemple typique des Canadiens qui ont procédé à des tentatives de dépollution de sédiments contaminés aux **organo-chlorés**. La technique se passe en caissons et en 3 temps au moins :

1. **Déshalogénation** sur acétate en anaérobiose stricte, étape très efficace par *Clostridium* et des méthanogènes.

2. Métabolisation des petites chaînes et **méthylation** des cycles ; éventuellement oxydation et minéralisation.

3. **Ouverture** des cycles le plus souvent en C2 + C4 faciles à incorporer au métabolisme intermédiaire.

Néanmoins, des modèles récalcitrants et complexes peuvent rester en l'état : c'est le cas des penta-chlorophénols ou PCP. Le cas des PCB (polychlorobiphényls) est amusant : ces polluants dangereux (à hauteur du DDT) ne sont quasi jamais dégradés dans le milieu et s'accumulent. On a pensé sélectionner des bactéries pour dégrader ces molécules ; sauf que les PCB sont utilisés pour traiter des graines, des agrumes pour éliminer des champignons, des parasites, des bactéries ! Il ne peut y avoir attaque bactérienne en raison de la présence de 5 ou 6 Cl. Dans cette catégorie, on trouve le pyralène (PCB isolant). Plus largement en dépollution assistée, les molécules en cause (pesticides) souvent mal biodégradables ne sont jamais choisies comme substrat principal et le cométabolisme (*Pseudomonas, Methylococcus, actinomycètes, Arthrobacter, Aspergillus, Penicillium, Rhizopus, Flavobacterium, Corynebacterium, Bacillus*) est obligé : il faut donc fournir des substrats préférentiels. Ces molécules sont souvent solubles dans les hydrocarbures et deviennent plus mobiles et plus inaccessibles. Ces molécules enfin peuvent être fixées ou adsorbées sur des supports (vases) et sortir du cycle de la matière (rémanence pour longtemps).

Sélectionner de bons indicateurs de qualité de milieu, recenser des biocapteurs fiables. Des écologistes ont démontré que des organismes vivants (souvent des macroorganismes, quelques microorganismes, le truitomètre par exemple, les **diatomées**) sont capables d'intégrer plusieurs facteurs en même temps

(meilleurs que des enregistreurs) et de déceler des gaz dangereux. L'idée peut s'étendre à la mise en place de tests dans la production d'enzymes, d'antibiotiques, d'hormones, de solvants, de vitamines (les bactéries rustiques sont très efficaces). Pour la fabrication de la bière par exemple, les composés d'arômes originaux sont décelés par des bactéries très sensibles.

Risque environnemental planétaire : et si les pôles changeaient de couleur (vert, rouge) ; si les champs de neige changeaient aussi de couleur. Si la photosynthèse était virosée et ne répondait plus ? Si une maladie pandémique touchait un maillon de la chaîne alimentaire universelle ? Si au lieu de poser la loupe médiatique sur l'aliment de l'assiette, on la posait sur les cultures et le sol qui les supporte, sur les eaux qui irriguent, les animaux d'élevage et de pêche et les conditions de production, d'alimentation !

Risque sanitaire. S'il y avait une guerre microbiologique, il serait difficile de désigner un vainqueur ; ce qui est sûr, c'est le nombre de victimes bien plus nombreux que par les armes. Les historiens savent que les épidémies, les maladies sexuellement transmissibles et la gangrène ont tué de 8 à 10 fois plus de combattants que les flèches et les balles des armes au cours des temps historiques. Le bioterrorisme serait viral et pas « charbon ».

Ma réflexion est féconde (dans l'affaire des concombres, vous êtes bien avancés de savoir que l'on a retrouvé des germes pathogènes dans des ornements de salade ; qui est responsable ? le restaurateur, le vétérinaire, l'agriculteur, le consommateur, le contrôleur ?). C'est l'excuse de l'expérience ; voici deux concepts à travailler.

Microbiologie et responsabilité : rédiger un Code du Vivant, du corps humain ?

(1) **De la difficulté de déterminer les responsabilités** et de déterminer les coupables, séparer le négligent de l'intentionnel en matière de maladie nosocomiale, de maladie sexuellement transmissible, d'intoxication alimentaire ? Sans parler pour le moment de l'usage du savoir-faire bactérien pour traiter de nos maladies ou dysfonctionnements (stérilité). Doit-on traiter selon le même schéma de procédure, la même grille d'évaluation un événement d'intoxication pour lequel l'agent contaminant se révèle être une cellule vivante (bactérie, moisissure), une macromolécule (poison, venin) une molécule simple (eau souillée, monomère ou dimère, allergène), un élément (mercure, plomb) ? Et les virus sont-ils des êtres vivants ? Est-ce au juriste de répondre ? Les exemples sont innombrables et tragiques. L'apiculteur était négligent ; il vous offre un pot de miel artisanal ; vous en donnez à vos enfants ; l'un d'eux en meurt ; qui est responsable de ce cas de botulisme classique ? Et les asperges de la châtelaine ? Et les salmonelles de la « Mary » ? Vous décidez de prendre un bon bain sur cette plage non surveillée et sans panneau ; votre compagnon récolte des « hénons » pendant votre baignade ; vous attrapez une virose grâce aux coquillages que vous avez mal préparés (virus entériques) et une parasitose grave (à *Naegleria*) pour les plongeons dans une eau tiède et accueillante ; vous vous en prenez à qui ? Et votre enfant entre de nuit aux urgences de l'hôpital pour une salmonellose offerte par la délicieuse glace à la fraise du goûter ! Votre compagnon est le seul à s'en sortir bien et résigné : il est sorti du bain couvert de méduses. Qui va prendre et apaiser votre colère ? Le juge va décliner votre offre de soupeser les subtilités et les hasards

de la nature. Changeons d'échelle en prenant du recul. Je me demande s'il ne serait pas plus (ou autant) responsabilisant pour le citoyen que le juriste fabricant de texte travaille sur un code du vivant (du corps humain) plutôt que sur des objets (l'aliment) destinés à l'être humain ou des morceaux (santé, environnement, nous retombons sur les dents du peigne) de manière à cadrer, régler et anticiper le plus de situations plutôt qu'à les dichotomiser, les éparpiller et les mettre en concurrence inégale dans des codes différents ; et dans ce contexte se trouve abordé le tabou « usages et manipulations du vivant » pour aller dans la direction opposée à celle établie (= bloquer la recherche, appauvrir le nombre et la qualité des brevets, moratoires, interdictions, favoriser indirectement les contournements vers un étranger plus indulgent…) et légiférer sur des concepts généralistes qui laissent toute liberté et font confiance aux collèges de juges en cas de procès. Un code du corps humain peut faire plus d'unité que ceux de la santé publique, de l'environnement et de l'aliment séparément qui ne peuvent traiter les surprises du vivant de manière exhaustive. Aujourd'hui les cas de figure microbiologique sont relativement simples quoiqu'ils posent des problèmes inimaginables et insolubles. Demain, la tête dans le guidon, ce sera inextricable. Je propose de lever la tête du guidon. Comment proposer un outil référentiel de mesure juridique dans des affaires de maladie infectieuse à géométrie variable ? A qui vous en prenez-vous pour un rhume ou une angine ? Le plus souvent à vous-même. S'il s'agit de la « grippe aviaire » (aviaire et porcine transmissible à l'homme, H5N1, H1N1) vous êtes les premiers à dire que la prévention de l'hiver passé a pris des proportions de **surdimensionnement** exagérées par rapport au risque et à nos moyens. Si la pandémie avait avancé, vous seriez présents au rang des indignés de l'imprévoyance gouvernementale. Le curseur du bon sens était bloqué sur la communication. On a incinéré les vaccins périmés. Les maladies infectieuses se présentent à géométrie variable et sont contractées selon des modalités différentes (aléatoire comme la maladie de Lyme, ciblée, régionale et environnementale comme la légionellose, saisonnière comme bon nombre d'affections ORL, accidentelle et collatérale comme une maladie nosocomiale, par négligence comme l'intoxication alimentaire, par omission comme une maladie sexuellement transmissible). Il y a fort à parier que le droit va punir l'artisan d'une négligence en matière de listériose et de rillettes consommées par un consommateur fautif et facilement guéri et fermer les yeux pour une transmission en toute connaissance de cause du SIDA à une partenaire qui va perdre la vie.

(**2**) **Anticiper** plutôt que courir derrière la jurisprudence. Comment réussir un code qui inclut les manipulations génétiques, les biotechnologies, les bio-banques et absorbe au fur et à mesure les avancées savantes ? Mieux vaut travailler sur une loi programme vaste (une **loi-programme sur l'eau** est envisagée pour 2015 ; il y a peut-être moyen de travailler en compatibilité avec ce projet) que sur des thématiques cibles. Rapidement l'actualité OGM sera dépassée par les greffes, les autogreffes, à l'usage des cellules souches, au clonage, au bouturage, aux embryons thérapeutiques, aux cultures cellulaires non différenciées, aux patchs. Actuellement le juge est assis entre deux chaises (autoriser/interdire) ; il peut filtrer, laisser passer un peu de progrès « politiquement correct » et tolérable et se tuteurer sur la rigidité morale en habillant le tout d'éthique et de rempart à l'argent ou au commerce. N'allez pas croire que ces techniques futuristes ne produisent pas d'aliments ou de médicaments. C'est faux ; il n'y a pas d'itinéraire incompatible entre produire un aliment, un ferment, un alicament, un médicament et tout ce que vous avalez et qui vous ment. Un exemple : le risque de clonage existe, celui des « aliments » et des « habitudes », des matières et des **concepts**. En amont le clonage des sources animales et végétales de l'alimentation, des **méthodes**. Le champ libre à la pandémie. L'excuse est la mondialisation de tout,

le nivellement des différences, la peur de l'originalité, l'excès des paramètres appliqués (température, pression, chimie). Le besoin de trouver le même produit partout.

Travailler sur les objets dilue les responsabilités et masque les responsables : faut-il rechercher le propriétaire des *Escherichia coli* de la région de Hambourg ou tous ceux qui l'on favorisé ou tous à la fois ? **Travailler sur le corps humain** (à partir de la naissance), c'est prendre de la distance et construire un cadre plus général. Il y a à la fois la victime, le dommage, le maillon faible et la suite à donner (échelle, sanction, indemnité…) ; il est urgent de créer un collège de juges-savants. Et d'avoir à l'avance des accidents un outil cadre simple et solide pour travailler.



Pour conclure, la montée du Juridique et du Judiciaire est inévitable. Elle accentue et accélère la dichotomie de connaissances et de responsabilités[29] entre consommateurs ignorants et assistés qui demandent des comptes et des responsables artisans, producteurs, industriels ou élus qui doivent rendre des comptes sans maîtriser les imprévus de la cellule vivante. Et les experts sont prudents. Nous allons vers de plus en plus de complexité, de contestations ; il faudrait explorer l'idée d'une lisibilité et une **traçabilité** « cadre » des produits consommés (et des partenaires consommés, des endroits consommés…) et davantage encore initier un travail en amont sur la formation des maillons-acteurs intermédiaires (froid, hygiène, dates, etc). Il faudrait aller vers une solidarisation de l'ensemble (s'habituer à travailler ensemble) pour monter un escalier, pas le descendre. Prenons un exemple où le culturel vient télescoper par surprise le juridique : pour une maladie contractée à l'hôpital et ses conséquences, un recours est considéré comme « normal » avec des chiffres « normaux » à la clé ; pour une intoxication alimentaire contractée au restaurant, les choses sont plus délicates et l'on se demande après beaucoup d'égarements si c'est le restaurateur qui doit des dommages, le transporteur en amont, le producteur en amont ou d'autres. Si c'est auprès d'un partenaire silencieux qu'est contractée une maladie sexuellement transmissible[30], la bactérie est différente de l'alimentaire, le point d'inoculation aussi mais le mal est fait. Pire, si je viens ici pour attraper un rhume, voire une angine, voire une pneumopathie, vous allez devoir me rendre des comptes.

La Microbiologie va dominer le domaine des sciences ; elle va décalquer la microélectronique (informatique, multimédia, high-tech) qui va dominer le domaine des techniques. Elle va se hisser à hauteur du droit qui domine et encadre la société. La Microbiologie et le droit travaillent en parallèle, elles doivent travailler en synergie : imaginons qu'intervienne un accident, la société (enquêteurs) appuie sur deux boutons : la microbiologie (prélèvements, analyses, identification) et le juridique (procédure, réglementations, responsables), le troisième bouton s'allume tout seul, celui des médias qui oblige à répondre des âneries dans l'urgence à des questions qui exigent patience et résultats différés. Si les deux disciplines parallèles se rapprochaient à bout touchant (comme il y a la police scientifique), la procédure engagée inscrirait instantanément ces faits divers dans un domaine d'enquête dirigée par des juristes scientifiques qui dresseraient un cordon temporel et spatial suffisant pour travailler sérieusement et éviter les communications désastreuses, les conséquences collatérales inadmissibles.

---

[29] Nul n'est censé ignorer la loi et l'ignorant en microbiologie devient responsable comme maillon faible d'une chaîne comportementale qui fait confiance ou qui joue au « pas vu, pas pris ». S'il est victime, on n'en parle plus.

[30] Le 28 octobre 2011, le Tribunal de Paris a condamné à 9 ans de prison un partenaire porteur du SIDA pour avoir contaminé son amie en toute connaissance de cause sans prévention.

La Microbiologie avec les bactéries, les enzymes, les molécules et les praticiens, le Droit avec les mots et les règles et les praticiens. Mêmes exigences, mêmes rigueurs, mêmes soucis de perfection, mêmes outils de référence, mêmes appréhensions de s'y frotter ou d'y être confrontés, mêmes interdits à la négligence ou la facilité. Le Droit est peut être considéré plus noble, plus abstrait, plus conceptuel et moins matériel, plus lié à la pensée et moins au manuel, plus « sec » face à une microbiologie plus « mouillée », les mains dans le cambouis. La tête a besoin des bras.

Microbiologie, Biodiversité et Développement durable.

Depuis l'émergence du concept, je disais développement soutenable à mes étudiants. Le vrai développement durable sur notre planète est **bactérien** ; Réfléchissez qu'en 3,5 Milliards d'années d'existence et de colonisation elles ont cultivé et entretenu une planète en pleine forme que nous avons déréglée et perturbée en moins d'un siècle. Chapeau. La clé du développement durable est à chercher dans les leçons bactériennes et dans leurs nombreux savoirs **métaboliques**.

Il faut inlassablement inventorier, rechercher, sélectionner et **optimiser** en pilotes les **fonctions** bactériennes rares de recyclage et de dépollution, les exclusivités du métabolisme : par exemple la fixation autotrophe d'azote atmosphérique ; la chimiosynthèse lithotrophe, les respirations anaérobies, les photosynthèses organotrophes ou anaérobies ; par exemple la solvantogenèse et l'alcoologenèse (plan **alcool**), par exemple l'hydrogénogenèse et les méthanogenèses, par exemple les finesses de l'amphibolisme avec la production de protéines et la mise en attente d'acides intermédiaires, la production de POU, par exemple la synthèse de polymères originaux (biocolles, résines, caoutchouc), par exemple la capacité à intégrer et exprimer des segments de patrimoine génétique empruntés à d'autres genres, d'autres groupes, etc. Par exemple la capacité à exprimer des gènes humains pour réparer nos défaillances organiques.

Avec la mondialisation de nos activités, la microbiodiversité devrait s'effondrer ; c'est très comique de sauver des papillons et des grenouilles, des orchidées et des lichens ; et les bactéries ? Même position que pour les OGM bactériens, on ne les voit pas, on ne s'en occupe pas.

Il y a quelque chose de choquant à pousser le pion de l'écologie, à légiférer au cas par cas pour protéger la nature et engourdir le littoral ou la montagne, mettre sous le coude la plupart des projets d'aménagement, et n'envisager sortir de la crise que par la croissance et la consommation ; c'est évidemment tromper les citoyens que de laisser supposer mener en parallèle deux idéologies orthogonales.

Dans le développement durable, je propose de **cultiver la mer** (apprendre à élever les poissons plutôt que se servir) et particulièrement les estuaires ; je propose des convois spatiaux pour traiter l'énergie et nous la procurer ; je propose d'éloigner la Terre de son Soleil de quelques décamètres, l'histoire de souffler un peu du réchauffement ; je propose de **domestiquer** des populations bactériennes (comme les chats, les chiens et les chevaux) et de les conditionner pour résoudre au cas par cas nos problèmes quotidiens et universels (eau, déchets, énergie, santé) : nous irions chez le marchand chercher notre

bocal de solutions. Les hommes attrapent des maladies que l'on impute aux bactéries ; l'inverse est devenu vrai : les bactéries sont malades des hommes. Maintenir les bactéries en excellente forme, c'est nous garantir une vie soutenable ; lutter contre, c'est prendre des risques, y compris le risque vital. La vraie croissance utile pour demain, c'est celle des levains microbiens. Nous faisons le contraire. Comme nous y allons, nous risquons de rompre prochainement les **cycles élémentaires**, le **cycle de la matière**. Bravo ; sous nos yeux et pas de pancartes !

Imaginons le pire :

(**1**) de plus en plus d'assistance, de lois, de règlements, de mondialisation d'un code de bonne conduite en matière d''agriculture, d'industrie, de santé et d'alimentation et de moins en moins de terres fertiles, de ruralité (de bonnes volontés responsables, de solutions locales, de travail par petites unités, d'artisanat), d'énergie, d'agriculture et de denrées alimentaires, bref comme une mondialisation de la pénurie, de la famine et de la pollution, c'est un **double langage** ; il faudra bien que « toutes » les parallèles se rencontrent et se parlent. Ces politiques-là et ces gouvernances-là, tellement médiocres et faibles qu'elles sont débordées par les affamés de profits sont écartelées par des objectifs concurrents, posées sur des quantités de populations d'organismes vivants muets ou résignés. Si vous tirez en premier le bas de la pile, le socle bactérien d'en bas (pesticides, chimie, antibiotiques), le plus disposé à nous aider, tout l'édifice va s'écrouler. Dites alors aux économistes que ce n'est pas tant les algues vertes, le méthane, le soufre, le pétrole, le plomb ou le mercure qui polluent, c'est l'argent.

(**2**) Tout incendie dans **une** entreprise conduit à revoir et augmenter les mesures anti-incendie dans **toutes** les entreprises ; toute explosion dans un silo fait de même ; tout incident de livraison par voie ferroviaire ou routière de même ; tout incident de chaudière, de vapeur, de tour aéro-réfrigérante, de revêtement de sol idem ; tout accident électrique, toute chute d'escalier, toute inondation, toute émanation de toxiques et de fumées fait revoir les mesures de prévention, de protection et de formation. Nous trouvons cela normal. Cette façon de travailler par empilement tous azimuts et harcèlement sur notre patrimoine industriel qui n'est pas tout jeune correspond à la fois à du rafistolage par rustines sur des usines « sénior » et de l'asphyxie efficace par mise en place d'un sarcophage tchernobylesque sur des endroits bien vivants et bien vitaux. Bref, nous ne faisons pas dans ce cas du développement durable mais du développement létal, mortel ; nous ne nous **tirons pas une balle dans le pied mais dans le cœur**. Un hebdomadaire traitait en septembre dernier des reliquats de l'explosion d'AZF dans une page prétendue environnementale, une sorte de dixième anniversaire fêté avec des bougies vertes. J'ai écrit au journal (qui a botté en touche mon texte) que les reliquats actuels d'AZF dont l'explosion catastrophique est un accident industriel posé sur une erreur fondamentale d'aménagement du territoire ne correspondent pas du tout à un scoop environnemental ; d'ailleurs le slogan de l'entreprise à l'époque était « l'azote propre ». CQFD. La presse ne comprend ni ne pratique « l'environnement ».

(**3**) La **biodiversité** est un thème contemporain et fédérateur. Chacun s'emballe pour la biodiversité. La biodiversité, c'est à la fois protéger des espèces et des biotopes menacés, entretenir la richesse du patrimoine génétique mondial, recenser les espèces les plus inaccessibles, faire l'inventaire des biomolécules et de leurs propriétés, instruire tout un chacun de respecter les êtres vivants ; bref tout

faire pour une bonne harmonie entre l'homme et le milieu naturel et en faire le moins possible pour nuire au monde vivant. Vœu pieux. Dès que nous quittons la terre ferme pavée de bonnes intentions, la vie des têtards et autres gastéropodes, et que nous atteignons la sphère des idées, des orientations politiques, des mesures réglementaires à géométrie variable, les **mêmes acteurs** (ardents défenseurs de biodiversité) militent pour le renoncement à la diversité. La diversité est une richesse pour la faune, pour les arbres, mais **pas pour les fromages**, les charcuteries, les boissons, les préparations et toutes ces originalités locales qui font la richesse de nos terroirs et limitent l'étendue d'une possible catastrophe. Comment des autorités formées à la diversité peuvent-elles produire des règlements conduisant à **l'uniforme**, des instructions menant au surdimensionnement technique, des contraintes à produire des aliments insipides de masse ? A hyper-stériliser des aliments que l'on croirait déjà mâchés, des bouillies, des purées ? Diversité à contresens. Voilà pourquoi le « Développement durable » et le « Management environnemental » sont perçus comme des étaux, des contraintes qui conduisent à **l'appauvrissement de toutes les diversités**, y compris culturelle.

Le pompon dans le comportement incohérent est de prôner la croissance à tout prix comme espoir unique de sortir de la crise, de viser l'absence de diversité pour toutes nos activités (mode de vie, alimentation, cultures, équipements, codes) et de militer pour la biodiversité des espèces sauvages[31] ! Le déraillement n'est pas loin. Il y a des signaux *via* les allergies, la résistance aux antibiotiques, les maladies nosocomiales et la baisse de la fertilité qui ne trompent pas. Et si la planète en avait marre de l'homme et conduisait son évolution vers l'extinction en fermant le robinet de la reproduction pour redonner la main aux bactéries et se refaire une période de biodiversité.

* * *

J'envie les juristes. Ils ont devant eux un travail colossal, une vraie œuvre à réaliser : **aujourd'hui, mardi 6 septembre 2011**, au Palais de justice de Paris, le Droit français (le pouvoir judiciaire) s'est déclaré impuissant à trouver des solutions raisonnables aux crises affectant les domaines de l'environnement et de santé publique (un responsable scientifique éminent bénéficie d'un non lieu dans l'affaire du nuage de Tchernobyl stoppé à la frontière ; les dysfonctionnements thyroïdiens sont-ils liés ou pas à ce nuage ? Dans le doute… Comparaison faite au sang contaminé posé sur l'affaire du vaccin contre l'hépatite). Ouvrons la boîte à outils ; elle est presque vide ; fabriquons les outils. En réponse à une brillante leçon inaugurale du Professeur Jean-Pierre Cot traitant de « **La violation du droit** » lors de la rentrée solennelle du 2 décembre 1967 au Centre Universitaire de Picardie (jeune Académie d'Amiens[32]), l'un de mes Maîtres fondateurs, le Recteur Robert Mallet répondait dans le même sens par un discours magistral resté référence à Amiens : « **Le devoir d'innover** » dans lequel les concepts d'imagination, de réflexion, d'ambition, d'audace, de construction, de progrès s'inscrivaient « dans les nécessités de l'esprit » jusqu'à emprunter à la révolution. « Violer le droit, c'est aussi lui lancer un défi ». Demain, si l'un de vos enfants devenu adulte voit l'un de ses organes s'altérer au point de devoir être remplacé, il vous **fera un procès** de même qu'à la maternité où il est né, à la sage-femme ou à l'obstétricien de

[31] Nous allons vers de plus en plus de « Nature » dans les esprits, de plus en plus d'écologie dans les intentions et tout juste le contraire dans nos comportements fondamentaux (alimentation, modes, codes) et le pilotage politique de nos sociétés. Je suis sûr que vous avez tous envie d'un 4x4 de marque allemande !

[32] L'Université d'Amiens est créée le 27 mars 1969 ; elle devient Université de Picardie le 17 décembre 1970 et Université de Picardie Jules verne en 1991.

n'avoir pas gardé les annexes embryonnaires et des cellules souches. Vous ferez quoi ? S'il découvre un gène défaillant lui conférant une maladie rare, il vous attaquera de n'avoir pas réalisé de culture cellulaire assistée (*via* les bactéries) pour lui réparer son génome ou remplacer son organe. Vous réagirez comment ? A trop lutter contre les bactéries (**physiquement et intellectuellement**) et tout ce qu'elles permettent de progrès et d'innovation en biotechnologie, leurs propriétés, leurs capacités (j'allais dire leur facultés) et potentialités, elles vont lutter davantage contre nous et nous recadrer avant de nous éliminer, car n'oublions pas que sur cette Terre, **les bactéries ont tous les droits sans devoir en répondre**.

Max Bugnicourt, novembre 2011.

PS : Si nous mettions le savoir-faire du sol et des abysses au **Patrimoine mondial** et sous nous creusions l'idée d'étendre le **génocide** à toute destruction systématique d'ADN rare, unique, essentiel, vital pour notre cycle ?

Rapide présentation personnelle de l'auteur :

Études de Biologie Générale, puis de spécialité (Microbiologie) ;
Thèse de Biologie Végétale en 1980.
Maître de conférences à l'Université de Picardie Jules Verne - Microbiologie à la lilloise.
Chef de service de Biologie végétale.
Responsable du DESS EADAA, option Développement Agricole et Agro-alimentaire à la Faculté de Pharmacie de l'Université de Picardie ; co-fondateur du DESS Qualité et Gestion de l'Eau (Master II Professionnel) à la Faculté des Sciences de l'Université de Picardie ; co-fondateur de la MST PVIA (Maîtrise de Sciences et techniques en Productions végétales et Agro-alimentaires).
Enseignements de Microbiologie en filière fondamentale et en filière appliquée (MST, DESS, DU, IUP).
Auteur du ***Dictionnaire de Microbiologie Générale*** (éd. Ellipses, 1995).
Commissaire-Enquêteur pour ce qui concerne les enquêtes environnementales et la microbiologie industrielle.
Collaborateur des éditions de Boeck pour la microbiologie (correcteur et relecteur pour les versions françaises d'ouvrages US).
Expert pour la gendarmerie (biologie végétale).
Participation à divers jurys et conférences.

Conférences.
Des bactéries et des hommes (les bactéries des villes et les bactéries des champs) ;
Mes amitiés bactériennes ;
Laver l'eau ;
Des microbiologies pour quoi faire ?
De l'Ecologie microbienne à la Microbiologie environnementale.